



MESTRADO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA E HIGIENE OCUPACIONAIS

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre
Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

ILUMINAÇÃO, ANÁLISE ECONÓMICA, CONFORTO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AMBIENTE DE ESCRITÓRIO

Irene Maia Oliveira Neves

Arguente: Professor Doutor Paulo Roberto da Costa
UFSM

Presidente do Júri: Professor Doutor José Manuel Soutelo Soeiro de Carvalho
FEUP

Co-orientador: Professor Doutor João Manuel Abreu dos Santos Batista
FEUP

2015



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto PORTUGAL

VoIP/SIP: feup@fe.up.pt ISN: 3599*654
Telephone: +351 22 508 14 00 Fax: +351 22 508 14 40
URL: <http://www.fe.up.pt> Correio Electrónico: feup@fe.up.pt

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Joana Cristina Guedes pela atenção, pelo apoio, pela contribuição para a realização deste trabalho e sobretudo pela amizade.

Ao Professor Doutor João Manuel Abreu Santos Baptista pela orientação, pela disponibilidade e paciência, dedicados ao longo deste estudo.

Agradeço aos meus pais que com amor, incentivo e motivação me acompanharam ao longo da minha vida no crescimento pessoal e profissional.

À minha família e amigos que me ajudaram a seguir em frente e a não desistir.

A todos os colegas de mestrado pelo companheirismo e amizade vividos.

A todos um grande “Bem-haja”.

RESUMO

Com o aumento das atividades laborais em escritório, necessita-se adequação destes espaços para que o ambiente, além das questões económicas relativas ao consumo de energia, contribua para a segurança, saúde e conforto visual do trabalhador, que no presente estudo, no que diz respeito às condições de trabalho, principalmente em relação ao conforto visual, se traduz em *stress* e fadiga visual.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo principal avaliar económica e ambientalmente, em cenário de Escritório, através da comparação da contabilização dos consumos de eletricidade provenientes da utilização da iluminação *LED* ou iluminação fluorescente, tendo em consideração a melhor solução técnica aliada ao menor consumo energético, custos de manutenção e qualidade de iluminação, avaliada no contexto de normas e recomendações Europeias, não descurando todos os aspetos relacionados com a segurança, conforto visual, saúde e bem-estar nos locais de trabalho.

Assim, a metodologia, utilizada, após recolha de informação científica via revisão bibliográfica e avaliação de soluções disponíveis no mercado por consulta a fornecedores, consistiu em definir materiais e métodos aplicar, recolher dados do atual sistema de iluminação constituída por lâmpadas fluorescentes tubulares T8, com recurso a um luxímetro para quantificar a iluminância de um conjunto de salas que pelas dimensões, organização e localização, tipificam a generalidade das constituintes de um determinado edifício. Igualmente foi realizado um projeto luminotécnico, com recurso à aplicação informática *DIALux evo 5.5.0*, em que foram eleitas as luminárias com lâmpadas fluorescentes T5 e com lâmpadas *LED*, em substituição das atuais luminárias, com lâmpadas fluorescentes T8.

Os resultados mostram que foi efetuada uma síntese e análise comparativa entre lâmpadas fluorescente T8 e T5 e lâmpada *LED* no sentido de aferir as opções mais vantajosas em termos económicos e de eficiência energética, levando em conta os valores de iluminância, uniformidade, encandeamento, índice de restituição de cor, temperatura de cor e densidade de potência luminosa, estabelecidos na norma *EN 12464-1(2002)*, de forma a garantir uma iluminação adequada.

De forma a aferir a viabilidade económica determinou-se o tempo de retorno (*PAYBACK*) das distintas propostas de solução.

A questão ambiental foi também avaliada, sendo a mais vantajosa neste domínio, a solução *LED*, com uma poupança anual de 1,62 Ton/KWh de CO₂, comparativamente com o teor do mesmo para as lâmpadas T8.

O estudo é conclusivo na vantagem em termos de economia de consumos, na aplicação de luminárias *LEDs* em substituição das lâmpadas fluorescentes T8 atualmente existentes e paralelamente na desvantagem decorrente do elevado custo de aquisição, com reflexo no *PAYBACK* previsível de 40,10 anos. Como alternativa aos *LEDs* aponta-se a solução de substituição das lâmpadas T8 por T5 que embora menos eficientes em consumo apresentam porém um *PAYBACK* de 18,6 anos, sendo por isso as eleitas como as melhores.

Palavras-chave: Iluminação; Conforto; Eficiência energética; Iluminação Led; Lâmpada fluorescente tubular.

ABSTRACT

With the increase in labour activities in the office space, it's needed adequation of this spaces so that the environment, more than economic reasons related to power consumption, contributes to the safety, health, and visual comfort of the employee, the in this study, in regards to the working conditions, primordially in the visual comfort aspect, results in stress and eyestrain.

As such, this work has as primary objective the economic and environmental evaluation, in an office, of different artificial lighting solutions, resorting to the comparison of energy consumption of lighting systems based on LED and fluorescent technology. In both cases it was searched the best technical solution allied to the lesser consumption, maintenance costs and lighting quality, assessed in light of European regulations and recommendations, not forgetting all aspects in regard to safety, comfort, health and well-being in the workplace.

The methodology used after gathering of scientific information through systematic revision and evaluation of solutions available in the market consisted in defining materials and methodology to use, gathering data of the current lighting system consisted of T8 fluorescent lamps, using a lux meter to quantify the illuminance of a sample of rooms that from their dimensions, displacement and localization typify the majority of the building of a given company. It was also made a lighting project, with resource to the *DIALux evo 5.5.0* application, in which it was selected the fixtures with T5 fluorescent and LED lamps, replacing the current T8 fluorescent lamps.

The results show that it was performed a summary, and a comparative's analyses between T8 and T5's fluorescent and LED lamps, in order to determine the most economic and energy efficient solution, following the standards in illuminance, uniformity, glare, colour rendering index, colour temperature, and light output density set in the *EN12464-1(2002)* regulation, as a way to assure an adequate lighting.

To evaluate the economic viability it was calculated the Payback time of the different solutions proposed.

It was also evaluated the environmental impact, concluding that the LED solution was most advantageous, saving 1,62 Ton/KWh of CO₂ year comparing to the T8 system.

The study reflects the advantages in energy economy of the application of LED technology in replacement of T8 fluorescent lamps currently used and ate the same time the disadvantage caused by the high price if acquisition, seen in the expected PAYBACK of 40,10 years. As an alternative to LEDs it is pointed out the replacement of T8 by T5 lamps, although less efficient they present a PAYBACK of 18,6 years, being as such elected as the best solution.

Keywords: Lighting; Comfort; Energy efficiency; LED Lighting; Tubular fluorescent lamp;

ÍNDICE

PARTE 1	3
1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Organização do trabalho.....	4
2 ESTADO DE ARTE	7
2.1 Enquadramento técnico e tecnológico.....	7
2.1.1 Fundamentos e Grandezas luminotécnicas.....	7
2.1.2 Lâmpadas e suas caraterísticas	7
2.1.3 Luminárias e suas caraterísticas	10
2.1.4 Dispositivos Auxiliares.....	12
2.1.5 Programas computacionais	14
2.2 Enquadramento legal/Normativo	16
2.3 Conhecimento científico	17
3 OBJECTIVOS, MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Objetivo do Trabalho	21
3.1.1 Objetivo Geral	21
3.1.2 Objetivos Específicos	21
3.2 Caraterização do edifício em estudo	22
3.3 Metodologia	22
3.4 Materiais.....	23
3.5 Métodos.....	26
3.5.1 Seleção da amostra	26
3.5.2 Medições.....	28
PARTE 2 – ANÁLISE LUMINOTÉCNICA.....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Situação atual (T8)	33
4.1.1 Valores medidos com luxímetro.....	34
4.1.1.1 Sala 1	34
4.1.1.2 Sala 2	35
4.1.1.3 Sala 3	35
4.1.1.4 Sala 4	36
4.1.1.5 Sala 5	36
4.1.2 Simulado no <i>DIALux</i>	36
4.1.2.1 Sala 1	37
4.1.2.2 Sala 2	38
4.1.2.3 Sala 3	39
4.1.2.4 Sala 4	41
4.1.2.5 Sala 5	42
4.1.3 Análise Comparativa	43

4.1.3.1	Iluminância	44
4.1.3.2	Uniformidade.....	45
4.1.3.3	Encandeamento	46
4.1.3.4	Densidade de potência de iluminação (DPI)	46
4.2	Projeto a realizar – Hipótese 1 (T5)	47
4.2.1	Simulado no <i>DIALux</i>	47
4.2.1.1	Sala 1	47
4.2.1.2	Sala 2	48
4.2.1.3	Sala 3	50
4.2.1.4	Sala 4	51
4.2.1.5	Sala 5	52
4.2.2	Avaliação da iluminância e uniformidade.....	53
4.2.3	Encandeamento	54
4.2.4	Densidade de potência de iluminação (DPI)	54
4.3	Projeto a realizar – Hipótese 2 (LED).....	55
4.3.1	Simulado no <i>DIALUX</i>	55
4.3.1.1	Sala 1	55
4.3.1.2	Sala 2	56
4.3.1.3	Sala 3	58
4.3.1.4	Sala 4	59
4.3.1.5	Sala 5	60
4.3.2	Avaliação da iluminância e uniformidade.....	61
4.3.3	Encandeamento	62
4.3.4	Densidade de potência de iluminação (DPI)	62
4.4	Análise comparativa das soluções luminotécnicas	63
4.4.1	Iluminância e Uniformidade.....	63
4.4.2	Densidade potência de iluminação relativa	65
4.4.3	Encandeamento	65
PARTE 3 – ANÁLISE TÉCNICO-FINANCEIRA		67
5	ANÁLISE TÉCNICO-FINANCEIRA.....	69
5.1	Consumo Energético	69
5.2	Custos.....	70
5.3	Análise do Retorno do Investimento.....	72
5.4	Análise de Rentabilidade	74
5.5	<i>Payback</i>	74
5.6	Emissão de CO ₂	75
PARTE 4 – CONCLUSÃO.....		77
6	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	79
6.1	Conclusões	79

6.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros.....	80
7	BIBLIOGRAFIA.....	83
8	ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tonalidade da luz em função da sua temperatura de cor (Philips, 2015).....	8
Figura 2 - Relação temperatura de cor da lâmpada e nível de iluminância (Teixeira, 2007).....	8
Figura 3 - Constituição da lâmpada fluorescente tubular (Teixeira, 2007).....	9
Figura 4 - Evolução das lâmpadas fluorescentes tubulares (Fonte: Philips, 2007).....	9
Figura 5 - Lâmpadas LED (Philips, 2015).	10
Figura 6 - Luminária a instalar.	11
Figura 7 - Exemplo luminária com difusor.	11
Figura 8 - Curvas de distribuição luminosa da T5 (Fonte: Philips, 2015)(Osram, 2007).....	12
Figura 9 - Exemplo de regular a luz artificial com luz natural (Fonte: Iberdrola).....	14
Figura 10 - Programa <i>DIALux evo</i> 5.5.0 utilizado.	15
Figura 11 - Fluxograma da metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo.....	23
Figura 12 - Luxímetro (Fonte: manual de instruções).....	24
Figura 13 - Interface de entrada de dados no programa <i>DIALux EVO</i> versão 5.5.0.	25
Figura 14 - Planta das salas em estudo no 2º andar.....	26
Figura 15 - Sala 1.	27
Figura 16 - Sala 3.	27
Figura 17 - Sala 4.	27
Figura 18 - Sala 5.	27
Figura 19 - Matriz de referência dos pontos a medir com luxímetro por sala de estudo.	30
Figura 20 - Medição da iluminância com o luxímetro na sala 5.	30
Figura 21 - Luminária com T8 existente e curva distribuição polar (Fonte: Philips, 2015).....	33
Figura 22 - Simulação no <i>DIALux</i> , às 16:30h na sala 1.	37
Figura 23 - Planta da sala 1 e as posições das luminárias.	37
Figura 24 - Mapas cromáticos obtidos no <i>DIALux</i> para a sala 1, com T8.	37
Figura 25 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 2.....	38
Figura 26 - Mapas cromáticos obtidos no <i>DIALux</i> para a sala 2, com T8.	39
Figura 27 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 3.....	40
Figura 28 - Mapas cromáticos obtidos nos vários horários, na sala 3 com T8.	40
Figura 29 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 4.....	41
Figura 30 - Mapa cromático obtido na sala 4 com T8	41
Figura 31 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 5.....	42
Figura 32 - Mapa cromático obtido na sala 5 com T8.	43
Figura 33 - Luminária para T5 e curva polar (Fonte: PHILIPS, 2015).....	47
Figura 34 - Distribuição das luminárias com T5 na sala 1.....	47
Figura 35 - Mapas cromáticos obtidos, na sala 1 com T5.....	48
Figura 36 - Distribuição das luminárias com T5 na sala 2.....	49
Figura 37 - Mapas cromáticos obtidos, na sala 2 com T5.....	49
Figura 38 - Planta da posição das luminárias T5 na sala 3.	50
Figura 39 - Mapas cromáticos obtidos, na sala 3 com T5.....	50
Figura 40 - Distribuição das luminárias com T5 na sala 4.....	51

Figura 41 - Mapa cromático obtido na sala 4 com T5.	51
Figura 42 - Distribuição das luminárias T5 na sala 5.	52
Figura 43 - Mapas cromáticos obtidos na sala 5 com T5.....	53
Figura 44 - Luminária <i>LED</i> e diagrama de intensidade polar (Fonte: <i>PHILIPS</i> , 2015).	55
Figura 45 - Distribuição das luminárias <i>LED</i> na sala 1.	55
Figura 46 - Mapas cromáticos obtidos na sala 1 com <i>LED</i>	56
Figura 47 - Distribuição das luminárias <i>LED</i> na sala 2.	56
Figura 48 - Mapas cromáticos obtidos na sala 2 com <i>LED</i>	57
Figura 49 - Distribuição das luminárias com <i>LED</i> na sala 3.	58
Figura 50 - Mapas cromáticos obtidos na sala 3 com <i>LED</i>	58
Figura 51 - Distribuição das luminárias com <i>LED</i> na sala 4	59
Figura 52 - Mapa cromático obtido na sala 4 com <i>LED</i>	59
Figura 53 - Distribuição das luminárias com <i>LED</i> na sala 5.	60
Figura 54 - Mapas cromáticos obtidos na sala 5 com <i>LED</i>	61
Figura 55 - Avaliação comparativa das iluminâncias nas três tecnologias, com A+N.....	63
Figura 56 - Avaliação comparativa das uniformidades nas três tecnologias, com A+N.	64
Figura 57 - Avaliação comparativa das iluminâncias, com iluminação (A).....	64
Figura 58 - Avaliação comparativa das uniformidades, com iluminação (A).	64
Figura 59 - Avaliação comparativa das densidades de potência das soluções em estudo.	65
Figura 60 - Avaliação comparativa do encandeamento das 3 soluções e Norma.	65
Figura 61 - Retorno de investimento.....	74
Figura 62 - Matriz de pontos 4x4 impostas ao <i>DIALux</i>	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos mínimos para Escritórios, segundo Norma <i>EN 12464-1</i>	16
Tabela 2 - Revisão Bibliográfica.....	18
Tabela 3 - Características das salas em estudo.	27
Tabela 4 - Quantidade mínima de pontos de referência a serem medidos.....	29
Tabela 5 - Número de Pontos calculados para medição da iluminância.....	29
Tabela 6 - Níveis de iluminação A+N , com T8 na sala 1.	34
Tabela 7 - Níveis de iluminação N , com T8 na sala 1.	34
Tabela 8 - Valores medidos com luxímetro na sala 1, com T8.....	35
Tabela 9 - Valores medidos com luxímetro na sala 2, com T8.....	35
Tabela 10 - Valores medidos com luxímetro na sala 3, com T8.....	35
Tabela 11 - Valores medidos com luxímetro na sala 4, com T8.....	36
Tabela 12 - Valores medidos com luxímetro na sala 5, com T8.....	36
Tabela 13 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> , comT8 na sala 1.	38
Tabela 14 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> , comT8 na sala 2.	38
Tabela 15 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> , comT8 na sala 3.	40
Tabela 16 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> , comT8 na sala 4.	41
Tabela 17 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> , comT8 na sala 5.	42
Tabela 18 - Avaliação comparativa da iluminância, com (A+N) e T8.	44
Tabela 19 - Avaliação comparativa da iluminância, com iluminação (N) e T8.....	44
Tabela 20 - Avaliação comparativa da uniformidade, com (A+N) e T8.....	45
Tabela 21 - Avaliação comparativa da uniformidade, com (N) e T8.....	45
Tabela 22 - Valores de encandeamento obtidos no <i>DIALux</i> , com T8.....	46
Tabela 23 - Densidade de potência de iluminação obtida com lâmpadas T8.	46
Tabela 24 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para T5, com A +N na sala 1.....	48
Tabela 25 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para T5, com A +N na sala 2.....	50
Tabela 26 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para T5, com A +N na sala 3.....	51
Tabela 27 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para T5, com A +N na sala 4.....	52
Tabela 28 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para T5, com A +N na sala 5.....	52
Tabela 29 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> com T5 nas salas em estudo.	54
Tabela 30 - Valores de encandeamento obtidos no <i>DIALux</i> , com T5.....	54
Tabela 31 - Densidade de potência de iluminação obtida com lâmpada T5.....	54
Tabela 32 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para LED, com A +N na sala 1.	56
Tabela 33 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para LED, com A +N na sala 2.	57
Tabela 34 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para LED, com A +N na sala 3.	58
Tabela 35 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para LED, com A +N na sala 4.	59
Tabela 36 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> para LED, com A +N na sala 5.	60
Tabela 37 - Valores obtidos no <i>DIALux</i> com <i>LED</i> nas salas em estudo.....	62
Tabela 38 - Valores de encandeamento obtidos no <i>DIALux</i> , com LED.	62
Tabela 39 - Densidade de potência de iluminação obtida com lâmpadas LED.	63
Tabela 40 - Consumo energético anual das luminárias.....	69

Tabela 41 - Custo de exploração anual.	70
Tabela 42 - Custo de manutenção anual.	71
Tabela 43 - Custo de Investimento das luminárias.	72
Tabela 44 - Análise comparativa da amortização das diferentes soluções.	73
Tabela 45 - Análise de rentabilidade ao fim de 24anos	74
Tabela 46 - <i>Payback</i>	75
Tabela 47 - CO ₂ não enviado para a atmosfera.....	75

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Índice do local.....	29
Equação 2 - Iluminância média.....	29
Equação 3 - Uniformidade	30
Equação 4 - Potência total consumida	69
Equação 5 - Consumo energético Anual.....	69
Equação 6 - Custo de Exploração Anual	70
Equação 7 - Custo de Manutenção Anual.....	71
Equação 8 - Custo de Investimento.....	71
Equação 9 - Amortização	72

GLOSSÁRIO

CIE	– International Commission on Illumination
PNAEE	– Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
ENE	– Estratégia Nacional para a Energia
E med	– Iluminância média
A+N	– Iluminação artificial e natural em simultâneo
N	– Iluminação natural
A	– Iluminação artificial
E min	– Iluminância mínima
E max	– Iluminância máxima
Reflexão especular	– Fontes pontuais de luz produzem zonas sobre-iluminadas na superfície refletora.
Reflexão difusa	– A luz reflete em todas as direções, com igual valor de intensidade.
Retrofit	– Consiste em conservar a estrutura original, acrescentando materiais e equipamentos modernos.

PARTE 1

1 INTRODUÇÃO

A iluminação é um elemento essencial na vida moderna, apresenta um peso relevante no consumo de energia elétrica. Desde os primórdios da Humanidade, uma das maiores preocupações do Homem tem sido a busca da luz como fonte de sobrevivência, orientação nos espaços e satisfação. Ainda na Era Pré-Histórica, o homem aprende a criar a luz, quando descobre como fazer o fogo. Posteriormente, consegue aprender a conservá-la. Desde então, o homem tenta desenvolver novas fontes de iluminação, visando a melhoria de sua eficiência e qualidade.

À medida que a população do mundo aumenta e as pessoas se esforçam para um padrão mais elevado de vida, a quantidade de energia necessária para sustentar a nossa sociedade é cada vez maior (Bayir, 2013).

O aumento drástico do preço do petróleo em 1990, na sequência da crise mundial de energia no final de 1970, levantou preocupações governamentais quanto à segurança energética (Burman, 2014). Novos caminhos têm que ser encontrados para viabilizar a sustentabilidade dos padrões de vida das sociedades, sem comprometer o futuro das gerações vindouras. Para evitar uma crise energética, os governos têm de estabelecer planos para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, a quantidade de energia necessária para sustentar a sociedade terá de ser contida (Burman et al., 2014).

Em ambiente de escritório devido ao aumento do tempo de interação dos trabalhadores com computadores, surgiu a necessidade de tornar o ambiente de trabalho motivante por forma a melhorar o desempenho laboral. Uma iluminação adequada no local de trabalho tem uma relação entre as condições de iluminação, saúde e o bem-estar e o desempenho visual (Veitch, 2013).

Na iluminação, mais do que a quantidade, a qualidade da luz é decisiva, no que respeita ao desempenho das atividades, como na influência que exerce no estado emocional e no bem-estar dos seres humanos. Selecionar o tipo de iluminação certa, consiste em encontrar o ponto de equilíbrio entre o desempenho, o conforto e o ambiente luminoso. Isto significa também encontrar, ou reunir, na situação particular aqui tratada de ambientes do tipo administrativo, os requisitos técnicos, os níveis de iluminação estabelecidos e regulamentados, a distribuição harmoniosa dos brilhos diretos, a limitação dos reflexos, a direção da luz, e o apertado controlo do encandeamento, modelando a cor da luz e as cores selecionadas para a atividade a desenvolver.

De acordo com dados recentes, a iluminação representa cerca de 15% do total do consumo elétrico a nível da Europa e de 20% a nível mundial, sendo 30% a 40% o consumo elétrico dos edifícios de serviços e 10% a 15%, o consumo elétrico na indústria (EDP, 2014).

Este facto e o aumento do consumo generalizado noutros segmentos, conduzem a uma cada vez mais importante necessidade de desenvolvimento de sistemas de iluminação eficientes. Assim, surgiu a norma Europeia EN 12464-1 (2002) sobre iluminação interior, que estabelece os requisitos mínimos para a iluminação de um local de trabalho, e do ambiente periférico diretamente relacionado. O uso de equipamento eficiente de iluminação conduz a um aumento do nível de iluminação e a uma redução de potência consumida, conseguindo-se poupanças substanciais de energia elétrica e qualidade de luz. A instalação de equipamento eficiente inclui: lâmpadas de alto rendimento, balastros eletrónicos de alto fator de potência e de baixa taxa de distorção harmónica (THD < 10%), armaduras com reflexão elevada e equipamento de controlo.

A Segurança e Saúde do Trabalho é um direito que assiste a todos (de acordo com o definido na legislação portuguesa e comunitária). Segundo o nº 19 da Carta Comunitária (1990) *“Todos os trabalhadores devem beneficiar de condições satisfatórias de proteção de saúde e segurança no meio onde trabalham”*. A mesma ideia encontra-se também descrita na Lei 102/2009 (2009) no art.º 5º onde se pode ler que o *“O trabalhador tem direito à prestação de trabalho em condições que respeitem a sua segurança e a sua saúde...”* e como tal, pode ler-se no artigo 15º da mesma Lei, que o *“O empregador deve zelar, de forma continuada e permanente, pelo exercício da atividade em condições de segurança e de saúde para o trabalhador, tendo em conta princípios gerais de prevenção”*.

Na Portaria 987/93 (1993), no artigo 8º, fixa as prescrições mínimas de segurança e saúde nos locais de trabalho, obrigando a que os locais de trabalho disponham de iluminação natural adequada ou nos locais que não possam dela dispor, iluminação artificial, complementar ou exclusiva, que garanta idênticas condições de segurança e de saúde aos trabalhadores. São assim, mantendo o conforto visual, a segurança e a eficiência luminosa aliadas à redução energética, os vetores principais em que assenta este trabalho.

O Decreto-Lei nº243/86 regula a segurança e higiene no trabalho nos estabelecimentos comerciais, escritórios e serviços, do qual se salienta que a iluminação deve cumprir vários requisitos e deve ser adequada às tarefas dos diversos postos de trabalho.

Neste contexto, soluções responsáveis prendem-se em investigar como obter as condições luminotécnicas mais adequadas ao trabalho e simultaneamente determinar a redução de consumo elétrico associada aos sistemas de iluminação que proporcionam maior eficiência, com a consequente diminuição das emissões de CO₂, respondendo dessa forma à questão fulcral:

Há possibilidade de aliar aumento de qualidade da iluminação e redução ou otimização dos custos da mesma?

Qual a solução mais eficiente a instalar num escritório, considerando o uso de lâmpada T5 e LED em substituição da lâmpada fluorescente T8?

É a resposta a essas perguntas que persegue este trabalho.

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Avaliar a iluminação atual;
- Dimensionar sistema de iluminação mais eficiente;
- Analisar parâmetros luminotécnicos;
- Executar análise técnico-financeira.

1.1 Organização do trabalho

Esta dissertação encontra-se estruturada em 8 capítulos, com a seguinte organização dos conteúdos:

Capítulo 1, é constituído por uma parte introdutória, onde é exposto a necessidade de sistema de iluminação adequada nos locais de trabalho em ambiente de escritório, onde deverão ser considerados a redução dos custos e consumos energéticos, aliada à eficiência e conforto visual de modo a proporcionar aos trabalhadores segurança, saúde e bem-estar.

Capítulo 2, aborda o Estado da Arte da pesquisa bibliográfica relativa ao tema aqui em estudo, bem como os conceitos científicos sobre fundamentos luminotécnicos para o entendimento do sistema proposto e o respetivo enquadramento normativo. É feita uma abordagem a respeito das luminárias e das lâmpadas fluorescentes e das lâmpadas *LEDs* utilizadas, apresentando-se seu princípio de funcionamento, características construtivas e aspetos físicos. Finalmente é mostrado programas aplicativos para cálculos luminotécnicos.

Capítulo 3, apresenta a componente prática onde descreve-se os objetivos, a metodologia, os materiais e os métodos a utilizar nas salas do edifício em estudo, baseados na revisão bibliográfica feita e nos conceitos abordados no capítulo anterior, para caracterização da iluminação existente e cálculo de um novo projeto de iluminação.

Capítulo 4, apresenta os resultados experimentais da iluminação existente e do novo projeto de iluminação, tratamento e análise luminotécnica com estudo comparativo das três tecnologias em estudo.

No capítulo 5, é efetuado a análise técnico-financeira contemplando o cálculo do consumo energético, da análise económica, dos custos de investimento, de exploração e de manutenção, bem como da emissão de CO₂.

No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões e perspetivas de desenvolvimentos futuros.

No Capítulo 7 apresenta-se a bibliografia, que serviu de suporte para a execução deste trabalho.

Por último no Capítulo 8 apresentam-se os Anexos.

2 ESTADO DE ARTE

2.1 Enquadramento técnico e tecnológico

A iluminação é uma necessidade humana elementar e como tal, a qualidade da mesma é decisiva, tanto no que diz respeito ao desempenho das atividades, como na influência que exerce no estado emocional e no bem-estar dos seres humanos. Conhecer a luz, as alternativas disponíveis e saber controlar quantidade e qualidade, são ferramentas preciosas para o sucesso de qualquer instalação. Para tal, é importante definir os fundamentos luminotécnicos, de forma a facilitar a interpretação do estudo aqui apresentado.

2.1.1 Fundamentos e Grandezas luminotécnicas

O **fluxo luminoso** [Φ] caracteriza-se pela quantidade total de luz emitida por uma fonte luminosa em todas as direções do espaço. A sua unidade de medida é o lm (lúmen).

A **intensidade luminosa** [I] representa a totalidade do fluxo luminoso emitido numa determinada direção. A sua unidade de medida é expressa em cd (candelas).

A **iluminância** [E] ou nível de iluminação é o fluxo luminoso que incide por unidade de superfície. A unidade de medida da iluminância é expressa em lux.

A **luminância** [L] ou Brilho é o quociente entre a intensidade luminosa emitida ou refletida numa determinada direção e a área projetada da fonte num plano perpendicular a essa direção. A luminância é a sensação de claridade ou brilho que o olho recebe de uma superfície e está diretamente ligada com a intensidade luminosa que atinge essa superfície e com o seu coeficiente de reflexão. A unidade de medida vem expressa em cd/m^2 (candela/metro quadrado).

2.1.2 Lâmpadas e suas características

Um sistema de iluminação de qualidade deve empregar a lâmpada correta, levando em consideração: a aplicação, o ambiente a ser iluminado e a atividade a ser desenvolvida no espaço. As lâmpadas devem ser escolhidas em função do seu rendimento luminoso e da vida útil. De forma a produzirem iluminação adequada a cada tipo de ambiente, a temperatura de cor e o índice de reprodução de cores também devem ser considerados. Para uma melhor interpretação, apresentam-se de seguida a definição dos seguintes parâmetros característicos das lâmpadas:

Eficiência energética ou **rendimento luminoso** [η] que relaciona o fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa e a potência elétrica absorvida no processo. Para comparar as lâmpadas é necessário saber quantos lumens são gerados por watt absorvido. Quanto maior for o rendimento melhor será a lâmpada e menos energia gastará. A unidade em que se expressa o rendimento luminoso é o lm/W (*lúmen/Watt*).

Encandeamento ou ofuscamento é o termo usado para caracterizar uma determinada distribuição de luminância ou de contrastes de luminância no campo de visão de um observador, causando dificuldade de visão.

A **temperatura de cor** [TC] expressa a aparência de cor da luz emitida pela fonte. Exprime-se em [K], (graus Kelvin). A escolha da cor das lâmpadas depende de inúmeros fatores, tais como, da iluminância, das cores do local e do mobiliário, da tarefa a desempenhar e do próprio clima. Quanto mais claro o branco, maior é a temperatura de cor. Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade da mesma. As temperaturas de cor da luz emitida por uma fonte luminosa têm uma relação próxima com a sua aparência e que é apresentada na Figura 1.

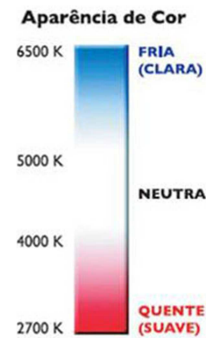


Figura 1 - Tonalidade da luz em função da sua temperatura de cor (Philips, 2015).

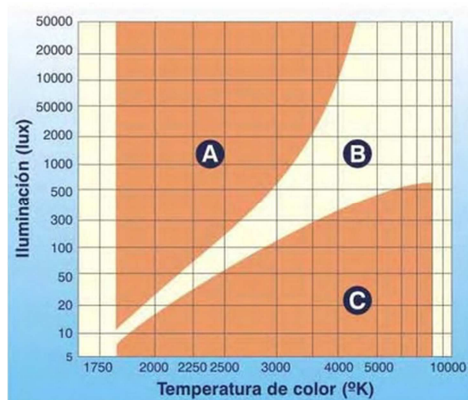


Figura 2 - Relação temperatura de cor da lâmpada e nível de iluminância (Teixeira, 2007).

Para uma iluminação de qualidade, a aparência de cor da fonte de luz deve estar relacionada com a iluminância, que quanto for a iluminância do ambiente, maior deve ser a temperatura da cor. A escolha da temperatura de cor da lâmpada deve ser também condicionada pelo nível de iluminância pretendido para o local. Essa relação é dada pela Figura 2, que representa o diagrama de *Kruithof*.

No diagrama, a zona B corresponde a uma zona em que a iluminação provoca uma sensação agradável. Na zona A, a impressão de cores é irreal, demasiado cálido e na zona C o ambiente luminoso é do tipo crepuscular, demasiado frio (Teixeira, 2007).

Índice de Reprodução de Cor [Ra ou IRC] é o valor percentual médio relativo à reprodução de cor, baseado numa série de cores padrão. Este índice quantifica a fidelidade com que as cores são reproduzidas sob uma determinada fonte de luz. É expresso em percentagem (%) por um número compreendido entre 0 e 100. Lâmpadas com índice de reprodução de cor de valor 100, apresentam as cores com total fidelidade e precisão.

Luminância é uma das características a ter em consideração nas lâmpadas, tal como referido na caracterização geral de grandezas luminotécnicas.

A **duração média de vida** de uma lâmpada é indicada pelo fabricante e refere-se ao tempo médio em horas até que a lâmpada deixa de emitir o fluxo luminoso.

Hoje em dia, deveríamos dar prioridade à iluminação natural, mas devido ao elevado consumo em iluminação artificial, procura-se instalar equipamentos que proporcionem utilização racional de energia, pressupondo a verificação de alguns parâmetros essenciais para a redução dos consumos energéticos, tais como:

- Dimensionar os níveis de iluminação artificial para os diferentes postos de trabalho;
- Optar pelo tipo de iluminação artificial mais adequada para um determinado posto de trabalho, tendo em conta a necessidade de restituição da cor das tarefas a executar;
- Usar sempre equipamentos de rendimento elevado e alto fator de potência;
- Utilizar sistemas de controlo e comando automático nas instalações de iluminação.

A escolha da fonte de luz irá ser decisiva para a escolha da luminária, do tipo de controlo e das futuras operações de manutenção da instalação. As lâmpadas estão agrupadas nos principais tipos de tecnologia de iluminação, consoante as suas características funcionais: descarga, incandescência, fluorescência, *LED - Light Emitting Diode*, em português Díodo Emissor de Luz.

De entre as várias existentes, neste trabalho irão apenas ser utilizadas lâmpadas fluorescentes tubulares T8 ($\varnothing 26 \text{ mm} = 8 \times (1/8)$ "), T5 ($\varnothing 16 \text{ mm} = 5 \times (1/8)$ ") e *LEDs*, uma vez que são, mediante as razões apresentadas, as que se adequam às funções em escritório, pelo que se descreve, de modo sucinto, o princípio de funcionamento das mesmas.

Sumariamente, a **lâmpada fluorescente** é constituída por um tubo de descarga alongado, com elétrodos nas suas extremidades, ver Figura 3. O interior do tubo de descarga possui um gás composto por mercúrio e gás inerte, que com a passagem da corrente elétrica, os eletrões excitam-se, chocam com os átomos de mercúrio e passam para uma órbita superior em torno do átomo. Quando regressam ao seu estado original, os eletrões emitem radiação ultravioleta que é convertida em luz visível na camada fluorescente que reveste o interior do tubo de descarga. O arranque das lâmpadas fluorescentes ocorre quando é aplicada tensão à mesma e após pré-aquecimento dos elétrodos no período de arranque (Lee, 2009).

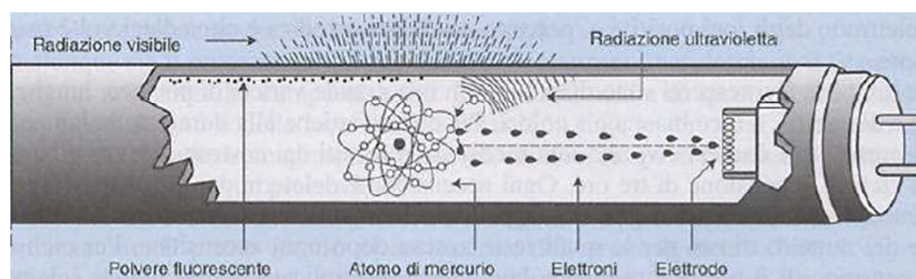


Figura 3 - Constituição da lâmpada fluorescente tubular (Teixeira, 2007).

Uma forma de melhorar a conservação de energia das lâmpadas fluorescentes é a redução do seu diâmetro, permitindo obtenção de maior eficiência energética, conforme apresentado na Figura 4. Inicialmente, as lâmpadas fluorescentes mediam 38mm de diâmetro e usavam um pó fluorescente. Atualmente existem lâmpadas fluorescentes com 16 mm de diâmetro, denominadas por T5, utilizando no interior do tubo de descarga um pó trifósforo, garantindo uma melhor restituição de cores e um rendimento bastante maior, quando comparadas com as lâmpadas comuns, pois oferecem menor barreira à passagem da luz que reflete no fundo da luminária (Philips, 2015).

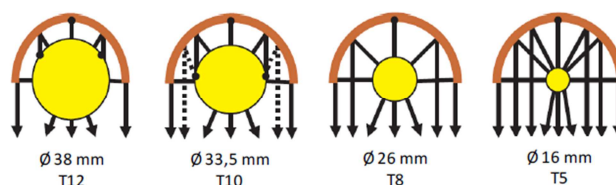


Figura 4 - Evolução das lâmpadas fluorescentes tubulares (Fonte: Philips, 2007).

Existem também lâmpadas fluorescentes T5 de alto rendimento (tipo *HE – high efficiency*) e de elevado fluxo (tipo *HO – high output*) (Lee et al., 2009).

Relativamente à tecnologia **LED**, já referida anteriormente, é uma fonte de luz constituída por um dispositivo eletrónico de estado sólido que integra uma junção p-n de material inorgânico que quando excitada por uma corrente elétrica emite radiação visível. Um **LED** é um díodo semicondutor, que emite luz por eletroluminescência. O comprimento de onda da luz emitida e a cor depende basicamente da composição química do material semicondutor utilizado.

A utilização de lâmpadas **LEDs** tem diversas vantagens, tanto no que respeita aos aspetos técnicos, tais como, o tempo de vida útil com 50.000 horas a 70% do fluxo, os reduzidos custos de manutenção, ignição instantânea, elevada eficiência energética, bem como o facto de não emitir qualquer tipo de radiação infravermelha ou ultravioleta, sendo estes indicados para ambientes onde é necessário evitar estas radiações. Como não emitem radiação infravermelha, podem ser considerados uma fonte de luz fria. O **LED** emite luz num determinado comprimento de onda, luz monocromática, isto significa que com a combinação certa de materiais no semicondutor podemos controlar a cor emitida pelo **LED**. Tem como limitações o elevado investimento inicial, a eficiência luminosa e a vida útil diminuírem muitíssimo com o aumento da temperatura, sendo necessário a ligação a dissipadores de calor (*heat sink*) e a um *driver* ou módulo. Na Figura 5, são apresentados algumas lâmpadas **LEDs**.

No que respeita aos aspetos estéticos, apresenta também inúmeras vantagens tais como, a flexibilidade de aplicação devido à sua reduzida dimensão facilitando a sua aplicação em qualquer pormenor arquitetónico. As cores saturadas sem qualquer necessidade de filtro, a existência de menor dispersão da luz, por se tratar de uma luz direta aumentando deste modo a eficiência do sistema podendo ainda apresentar qualquer cor e tonalidade (Wu, 2011).



Figura 5 - Lâmpadas LED (Philips, 2015).

2.1.3 Luminárias e suas características

Uma luminária é um dispositivo constituído de elementos óticos concebidos para distribuir a luz, elementos estruturais para posicionar e proteger as lâmpadas e de elementos elétricos e eletrónicos (balastros) para ligar a lâmpada à fonte de alimentação.

Inicialmente as luminárias tinham por função apenas servir de sustentação e interface de conexão entre as lâmpadas e a rede elétrica. Com o objetivo de aumentar a eficiência luminosa da luminária, foram desenvolvidos diversos tipos de conjuntos óticos, com a função de assegurar a distribuição de fluxo luminoso desejado, para obtenção do melhor rendimento possível, bem como modificar a luz emitida pelas lâmpadas, para uma otimização da sua utilização. A função da luminária passa também por evitar o encandeamento por parte dos utilizadores, garantindo a sua segurança e a dos próprios componentes, bem como proporcionar a proteção das lâmpadas face às condições variáveis, de utilização, do sistema ótico e dos componentes elétricos e

eletrónicos. Os principais componentes que constituem uma luminária são o corpo e a ótica, conforme Figura 6.

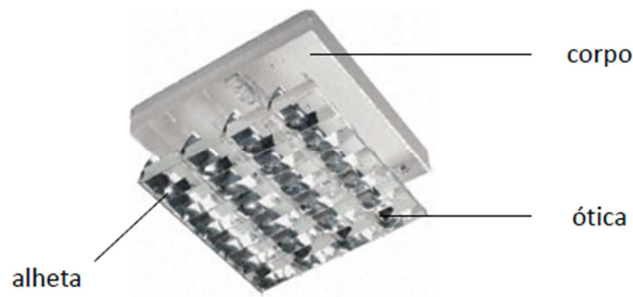


Figura 6 - Luminária a instalar.

O **corpo** é executado em chapa de aço macio com termolacagem a branco, deve garantir as condições para a fixação, fácil acesso e bom funcionamento da aparelhagem auxiliar, das lâmpadas e do sistema ótico. A **ótica** é constituída pelo refletor. O **refletor** consiste num componente ótico cuja função é permitir a distribuição do fluxo luminoso, proporcionando um melhor aproveitamento da luz, uma vez que o fluxo luminoso emitido para cima é reenviado para baixo. Quando o objetivo é obter-se reflexão regular ou especular, são constituídos em vidro espelhado, alumínio abrilhantado ou cromo polido, sendo que, quando se pretende obter reflexão difusa, são constituídos em alumínio ou chapas pintadas, de acordo com a Figura 7.

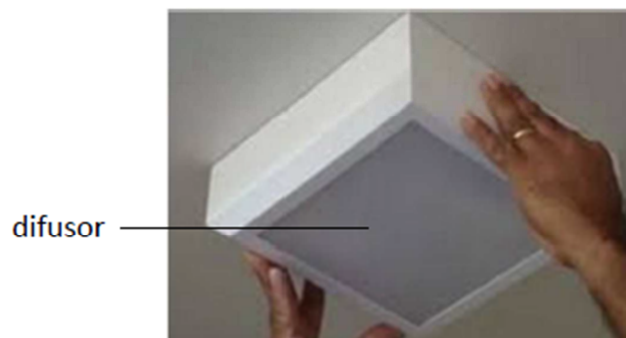


Figura 7 - Exemplo luminária com difusor.

A forma e a qualidade do difusor vão afetar o rendimento global da luminária. A utilização de uma superfície refletora de alumínio possibilita o aumento da reflexão para 95%, ao contrário dos 70% obtidos por intermédio de mera tinta branca. Muitas luminárias possuem sistemas de reflexão corretamente desenhados, no sentido de direcionar a luz para os locais pretendidos, obtendo-se, portanto, um determinado efeito com menos luminárias ou lâmpadas.

A escolha de luminárias adequadas tem por base uma variedade de aspetos construtivos, de qualidade das matérias-primas utilizadas, eficácia das suas óticas e quando aplicável, aspetos estéticos, pelo que dever-se-á ter em conta algumas características, tais como: o rendimento, a curva de distribuição luminosa, o encandeamento.

O **rendimento da luminária** é a relação entre o fluxo luminoso emitido pela luminária medido sob condições práticas especificadas e a soma dos fluxos luminosos individuais das lâmpadas operando fora das luminárias em condições também específicas.

A **curva de distribuição luminosa**, fornecida pelo fabricante, é a representação da intensidade luminosa em todos os ângulos em que ela é direcionada num plano, porque de uma forma geral as fontes luminosas não emitem igualmente em todas as direções, sendo necessário conhecer a intensidade luminosa em cada direção. Esta curva indica se a lâmpada ou luminária têm uma distribuição de luz concentrada, difusa, simétrica, assimétrica etc. Deverá ser apresentada, no mínimo, nos planos, longitudinal e transversal. A Figura 8 representa as curvas de intensidade luminosa no plano transversal e longitudinal para a luminária de lâmpada fluorescente tubular T5 utilizada no presente trabalho, TBS460 SQR 4xTL5-14W HFP C8 4xTL5-14W/840.

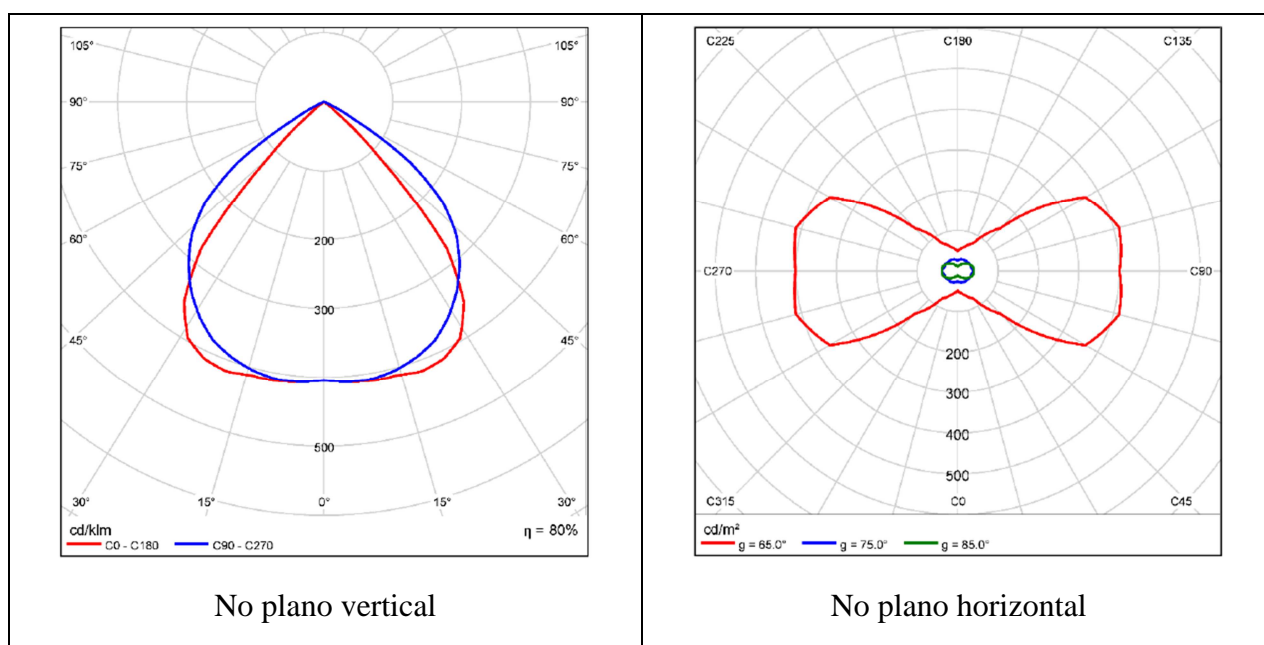


Figura 8 - Curvas de distribuição luminosa da T5 (Fonte: Philips, 2015)(Osram, 2007).

O **encandeamento** provocado ao utilizador por uma luminária, designado UGR (*Unified Glare Rating*) é a sensação desconfortável que, no limite, pode ser limitadora ou mesmo inibidora da visão, originada por luminárias ou superfícies excessivamente brilhantes no campo de visão das pessoas. Nos locais interiores de escritório, ou outros, o desconforto causado pelo encandeamento é, normalmente, devido ao brilho direto provocado pelas luminárias, ou pela incidência direta da luz solar (ISO 8995, 2002).

A **uniformidade** está relacionada com a variação do nível da iluminância no ambiente. A iluminância de um local deve variar gradualmente. De acordo com ISO 8995 (ISO 8995, 2002), a uniformidade da iluminância é definida como a relação entre os valores, mínimo e médio de iluminância.

2.1.4 Dispositivos Auxiliares

A lâmpada fluorescente para funcionar precisa de um **balastro**, cujas funções são as seguintes:

- Limitar a corrente elétrica a um valor correto no circuito;
- Pré-aquecer os eletrodos para provocar a emissão de eletrões;
- Produzir a tensão de arranque para iniciar a descarga.

Os balastros agrupam-se em diferentes classes, de acordo com a sua eficiência energética. A Norma Europeia 2000/55/EC veio proibir a venda dos balastros convencionais menos eficientes (classe D, C). Atualmente existem cinco classes de eficiência energética: A1, A2, A3, B1 e B2, correspondendo a ordem indicada a um decrescente índice de eficiência energética.

As classes A1, A2 e A3 aplicam-se aos balastros eletrónicos, as classes B1 e B2 correspondem aos balastros magnéticos de perdas reduzidas.

O uso de balastros eletrónicos com arranque por pré-aquecimento faz com que as lâmpadas durem 50% mais do que com balastros eletromagnéticos e ainda oferecem um conjunto de vantagens relativamente aos balastros eletromagnéticos, como:

- Anulação de cintilação durante o funcionamento devido a alta frequência de operação;
- Poupança de energia entre 20% a 30%;
- Desliga automaticamente as lâmpadas em caso de avaria;
- Após resolução das avarias, liga automaticamente a lâmpada;
- Dispensa os arrancadores e os condensadores;
- Baixo campo magnético;
- Alto fator de potência ($> 0,95$);
- Anulação do ruído;
- Baixa temperatura de funcionamento;
- Menor potência absorvida;
- Fluxo constante independentemente da tensão da alimentação;
- Aumento do tempo de vida útil da lâmpada;
- Diminuição do peso e volume dos componentes magnéticos;
- Taxa de distorção de harmónicos (THD) $< 10\%$, entre outros.

Com a aplicação de balastros eletrónicos com regulação de fluxo é possível controlar a emissão de luz nas lâmpadas fluorescentes, com isto contribuindo diretamente para a manutenção do fluxo luminoso e a vida útil da lâmpada.

Na procura recorrente de uma gestão energética cada vez mais eficiente, o conceito de **sistema de controlo de iluminação** deve considerar no projeto elétrico, a iluminação natural, o movimento, o controlo e/ou monitorização das condições existentes.

Para o sistema de controlo de iluminação existe no mercado várias soluções, como por exemplo:

- Detecção de presença;
- Detecção de presença conjugada com nível de luz natural;
- Regulação da intensidade luminosa em função da luz natural;
- Conjugação destas funcionalidades e possibilidade de ordem manual;
- Sistemas complexos de integração de controlo e regulação do sistema de iluminação.

Estas soluções, bem como a escolha de fontes de luz e luminárias eficientes podem trazer poupanças de energia na ordem dos 70% face à instalação original.

O sistema de comando e a divisão dos circuitos de iluminação deverão ser projetados de modo a aproveitar ao máximo a luz solar, visto esta ser uma fonte que melhor proporciona uma iluminação de qualidade. A iluminação deve ser utilizada em níveis suficientes para as atividades desenvolvidas nos espaços em questão e apenas quando é necessária. Nas luminárias com a aplicação dos balastros eletrónicos com regulação de fluxo é possível controlar a emissão de luz nas lâmpadas fluorescentes, pois permite que o nível de iluminação seja apenas o necessário para atividade desenvolvida, sem comprometer o conforto dos utilizadores, reduzindo assim, o consumo energético em iluminação. A Figura 9 apresenta um exemplo de regular a luz artificial com a luz natural.

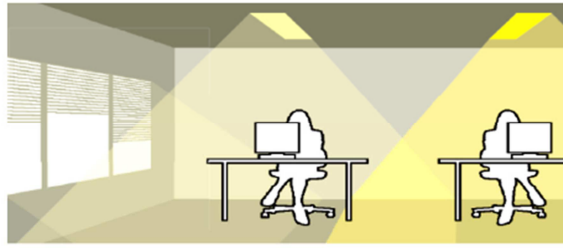


Figura 9 - Exemplo de regular a luz artificial com luz natural (Fonte: Iberdrola).

2.1.5 Programas computacionais

A utilização de ferramentas de simulação para o projeto de iluminação artificial é extremamente importante para auxiliar o projetista no uso eficiente da energia de modo a reduzir custos e proporcionar conforto. Os programas computacionais fornecem resultados quer quantitativos quer qualitativos do projeto de iluminação.

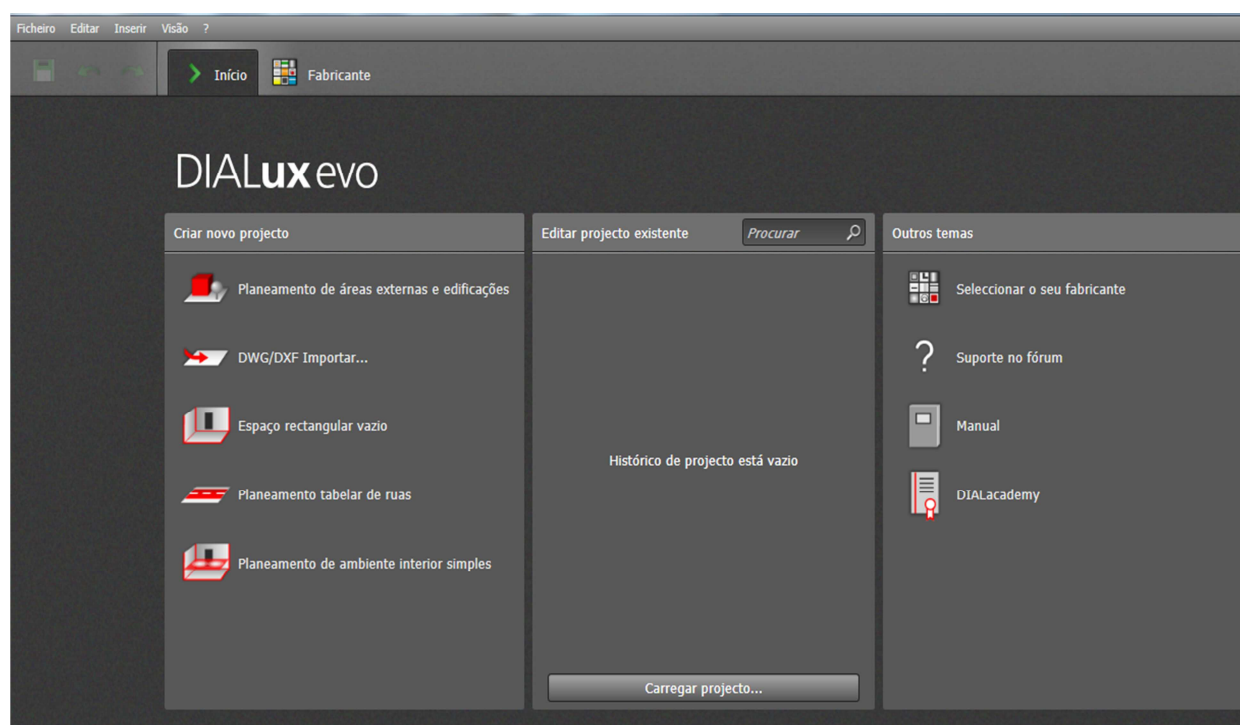
Os aspetos quantitativos referem-se aos valores de iluminância do ambiente, que podem ser comparados com os valores necessários para a atividade desenvolvida, dados pela norma EN 12464-1 (2002). Os aspetos qualitativos consideram, por sua vez, a percepção visual através da visualização do espaço iluminado por meio de imagens texturizadas que podem ou não ser foto-realistas.

A simulação computacional auxilia a compreensão de fenómenos físicos da luz, avaliando o impacto decorrente da manipulação dos materiais, das cores, das lâmpadas e luminárias nos níveis de iluminação. Dessa forma, a simulação serve para dar apoio técnico a julgamentos ou suposições feitas durante o processo de projeto.

Os programas computacionais permitem obter uma visualização realista do espaço antes de este ser projetado. É um aliado do projetista luminotécnico, pois permite modificar ambientes, obter representações foto-realistas, resultados numéricos e efetuar cálculos precisos de iluminação em menor tempo e com maior precisão, além de que permitem facilmente determinar a concordância do projeto com a legislação em vigor.

Existem vários programas computacionais para dar suporte ao projeto luminotécnico. Os mais utilizados são: *ADELIN*, *DAYLIGHT*, *RADIANCE*, *LUMEN*, *RELUX*, *WINELUX*, *DIALUX*.

Neste trabalho foram experimentados os programas *WINELUX* 3.1 e o *DIALux* evo 5.5.0 (64 bits) da empresa *DIAL GmbH*. O escolhido foi o *DIALux*, conforme se visualiza na Figura 10, cujo critério de escolha foi permitir simular com precisão, a influência da luz natural e artificial nas salas em estudo.

Figura 10 - Programa *DIALux evo* 5.5.0 utilizado.

Como limitações, pode destacar-se que para ter a iluminação simulada, o ambiente deve estar totalmente caracterizado, ou seja com formas, materiais, cores, lâmpadas e luminárias especificadas da mesma forma como será quando executado.

Para modelizar os espaços no *DIALux* é necessário inserir geometria do espaço, (comprimento, largura e pé direito), indicar o coeficiente de reflexão das superfícies (teto, paredes e pavimento e mobília), o fator de depreciação, distribuição fotométrica das luminárias, marca e modelo das luminárias, altura do plano de trabalho e a altura de montagem da luminária (saliente ou encastrada). Com base nos dados inseridos, o *DIALux* calcula o nível de iluminação no plano de trabalho, a uniformidade da luz no espaço, a densidade relativa, entre outros.

Encontra-se disponível na internet com inúmeras parcerias com fabricantes de iluminação, tais como BEGA, ETAP, ERCO, GE, OSRAM, PANASONIC, PHILIPS, THORN, entre outros, permitindo assim, a criação de bases de dados com a modelizações de aparelhos de iluminação que ajudam na simulação dos ambientes reais a iluminar. O programa possui uma interface de rápida aprendizagem, possuindo comandos de fácil assimilação, importa formatos de arquivos gráficos, como o *DXF*, *DWG* e *3DS* e aceita sólidos e superfícies modeladas em outros programas. A ferramenta utiliza dois algoritmos de iluminação global: o *radiosity*, usado para modelar a interação da luz entre superfícies difusoras e o *Ray Tracing* que é uma técnica que permite adicionar destaque, reflexões e transparências.

O programa permite calcular com precisão a maneira como a luz se propaga no ambiente, produzindo imagens realísticas, e têm como principais aplicações a simulação dos efeitos da iluminação e a análise fotométrica quantitativa. Possui ainda uma vasta biblioteca de texturas de materiais, de lâmpadas e de luminárias. O *DIALux* fornece todos os resultados luminotécnicos bem como uma simulação do espaço em *3D*, permite ainda calcular o número ideal de luminárias e posicioná-las automaticamente, assim como, sempre que necessário, adicioná-las manualmente ou ajustá-las. Para que não seja tão fácil imaginar o espaço projetado, o *software* ajuda a mostrar as ideias de uma forma visual e apelativa. Ao empregar texturas, é possível compilar uma apresentação do projeto, muito semelhante à realidade, que por vezes é muito importante para o utilizador tomar uma decisão.

2.2 Enquadramento legal/Normativo

Os Estados membros da União Europeia têm vindo a emitir cada vez mais regulamentos com o objetivo de reduzir o consumo de energia e a emissão de gases de efeito de estufa, com vista a promover a melhoria do desempenho energético e das condições de conforto dos edifícios. É neste contexto que surge a Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, dando origem ao Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE).

A Estratégia Nacional para a Energia 2020 (ENE 2020) estabelecida na Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, de 15 de Abril, enquadra as linhas de rumo para a competitividade, o crescimento e a independência energética de Portugal, através da aposta nas energias renováveis e na promoção integrada da eficiência energética, garantindo a segurança de abastecimento e a sustentabilidade económica e ambiental do modelo energético.

Esta estratégia encontra-se assente num conjunto de eixos, donde se destaca a eficiência energética e a sua promoção através de medidas que evitem desperdícios de energia.

Assim, o domínio “Energia” visa, designadamente:

- a) A criação de um quadro energético regional inovador, pautado por critérios e práticas estruturantes de eficiência energética, e de intensificação da penetração de vetores energéticos de menor impacte ambiental no quadro do cumprimento das metas da União Europeia para 2020;
- b) A promoção de uma estratégia coerente e consistente de gestão da procura energética por parte das atividades, de estímulo às operações que se orientem para a prossecução dos objetivos últimos de eficiência energética, de valorização das energias endógenas e de redução das emissões de gases de efeito de estufa.

Torna-se, portanto, necessário apostar em tecnologias mais eficientes para melhorar a eficiência dos sistemas de iluminação.

Com vista, em ambiente de escritório, obter a qualidade de iluminação adequada a cada espaço/tarefa, com o máximo de eficiência energética, o Comité Europeu de Normalização - CEN, publicou a norma EN 12464-1 (2002), que estabelece para os escritórios os requisitos mínimos para a iluminação de um local de trabalho e da área circundante diretamente relacionada. A Tabela 1 apresenta os níveis de iluminação adequados para as diferentes tarefas a desempenhar.

Tabela 1 - Requisitos mínimos para Escritórios, segundo Norma EN 12464-1.

Tipo de interior, tarefa ou atividade	E_m	UGR_L	U_o	R_a
Desempenho do trabalho, fotocópia, etc.	300	19	0,4	80
Escrita, digitação e leitura, processamento de dados num PC	500	19	0,6	80
Desenho técnico	750	16	0,7	80
Posto de trabalho CAD	500	19	0,6	80
Sala de conferências e reuniões	500	19	0,6	80
Secretárias de receção	300	22	0,6	80
Arquivos	200	25	0,4	80

A norma internacional ISO 8995 (2002) fixa valores de iluminância de referência, em função de tarefas e atividades desempenhadas pelos trabalhadores. De acordo com a norma é necessário uma boa iluminação nos locais de trabalho para que as tarefas sejam desempenhadas de forma confortável e segura, tendo em conta critérios qualitativos (encandeamento, temperatura da cor, etc.) e critérios quantitativos (iluminância, uniformidade) de forma a garantir um bom desempenho laboral.

No âmbito dos objetivos do Protocolo de Kyoto 1997 para a proteção climática, a UE definiu um conjunto de medidas para a utilização económica e sustentável, dos recursos. Após proibição dos balastros convencionais para lâmpadas fluorescentes com a Diretiva Europeia 2000/55/EC, com a redução do conteúdo de substâncias perigosas com a Diretiva Europeia 2002/95/EC (*RoHS*), e regulamentação sobre a recolha e reciclagem de dispositivos eletrónicos na Diretiva Europeia 2002/96/EC (*WEEE*), a UE emitiu uma diretiva quadro, a Diretiva Europeia 2005/32/EC, para definir os requisitos para o *design* ambiental aceitável (*eco-design*) dos produtos que utilizam energia (*EuP*).

Em Novembro de 2009, esta diretiva foi substituída por uma diretiva quadro atualizada, a Diretiva Europeia 2009/125/EC, relativa à conceção ecológica dos produtos consumidores de energia (*ErP*). Esta alteração não afetou as medidas de implementação já definidas.

Estas medidas de implementação para o setor das lâmpadas para o consumidor (Regulamento 2009/244/CE - *Domestic Lighting*, part 1) e lâmpadas fluorescentes e de descarga de alta pressão (Regulamento 2009/245/CE - *Professional Lighting*), refletem os objetivos climáticos da UE definidos desde o início de 2007 até 2020.

2.3 Conhecimento científico

Para revisão bibliográfica apresentada a seguir, esta pesquisa teve como tema “Iluminação, conforto e eficiência energética em ambiente de escritório”.

A pesquisa bibliográfica realizada, baseou-se em alguns dos princípios utilizados na metodologia de revisão sistemática, conhecida como PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), para identificar artigos relacionados com este trabalho, publicados em algumas bases de dados ou revistas científicas.

A nível de identificação foram consultadas:

- Bases de dados

Academic Search Complete, Compedex, Inspec, ScienceDirect, Science & technology Proceeding, SCOPUS, Web of Science;

- Revistas científicas

IEEE Xplore, Informaworld (Taylor and Francis), MetaPress, ScienceDirect (eJournals), Science Magazine, Wiley Online Library.

A partir das palavras-chave, que foram utilizadas para a pesquisa bibliográfica, os resultados foram refinados por combinações sucessivas de operadores booleanos, com exclusão dos seguintes artigos:

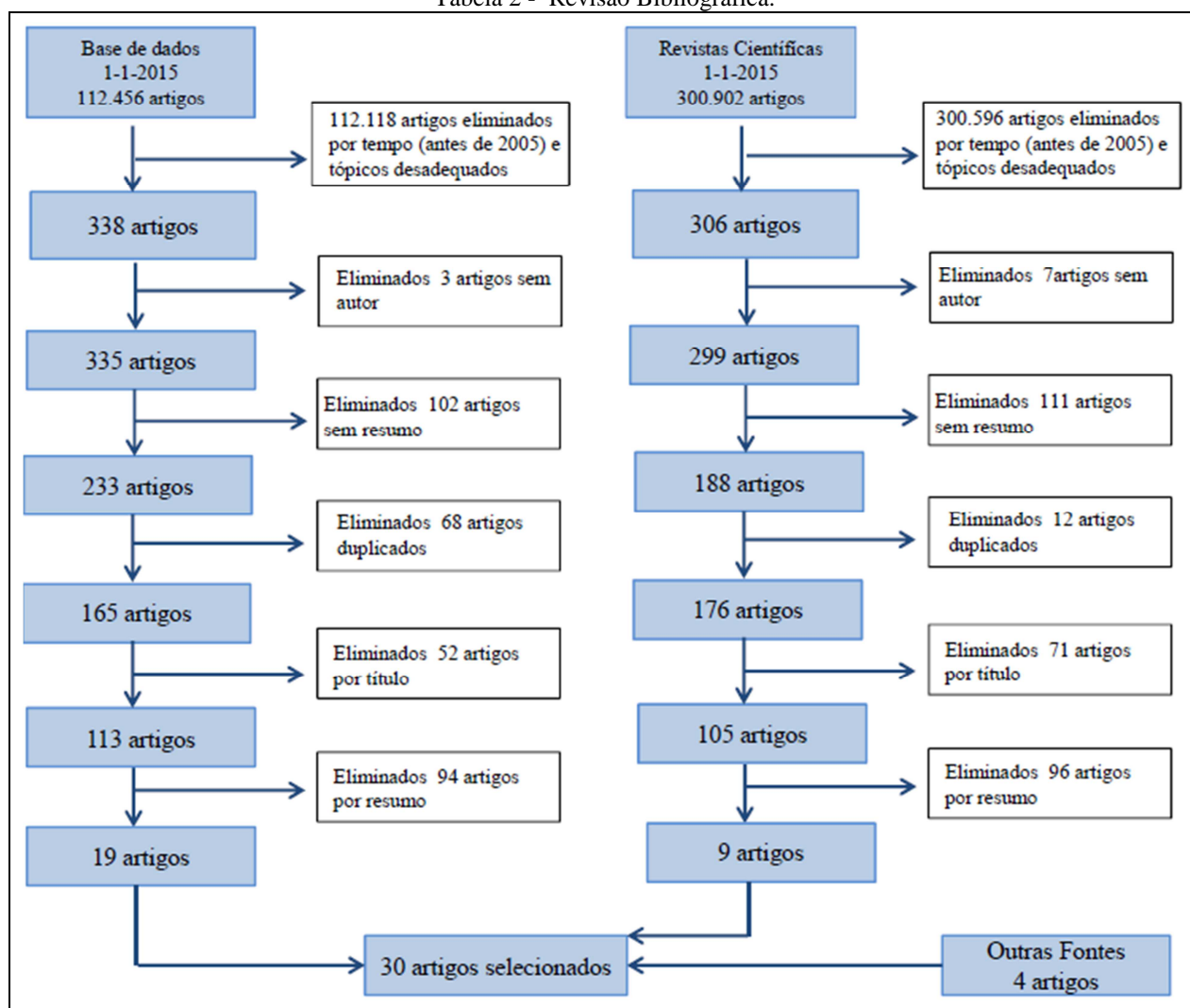
- Data anterior a 2005;
- Não satisfizessem os tópicos referentes ao tema em análise;
- Fossem duplicados;
- Não tivessem autor identificado;

- Contivessem texto incompleto;
- Contivessem artigos fora do tema em análise, via título ou via resumo.

Finalmente e após a execução de pesquisa de novas palavras-chave nos artigos encontrados, seguida de nova pesquisa cruzando as novas palavras-chave com as anteriores, chegou-se ao resultado apresentado na Tabela 2, no qual assentam os fundamentos teóricos deste trabalho.

A eleição do ano de 2005 como fronteira delimitadora desta revisão, deriva essencialmente da tecnologia da iluminação *LED* não ter expressão muito significativa antes daquele ano.

Tabela 2 - Revisão Bibliográfica.



Muitos dos trabalhos encontrados trata o tema de forma teórica, com recursos a modelos matemáticos, sem experimentação prática de resultados. Outros, têm como metodologia a criação de situações a analisar e a obtenção de resultados por recursos a questionários aos utilizadores dos espaços, como entre outros, por exemplo (Islam, 2013; Veitch et al., 2013).

A ideia básica veiculada naqueles artigos é da vantagem que decorre da substituição das lâmpadas fluorescentes T8 por lâmpadas fluorescentes T5 e estas por *LED* (Kumpeerakupt, 2012). Resulta também daqueles artigos a conclusão mais ou menos generalizada que maiores

vantagens ao nível de poupança energética ocorreriam se conjugada tal substituição com sistemas de controlo de fluxo luminoso dos sistemas iluminantes.

É convicção generalizada, com a qual se concorda, que um sistema de iluminação bem projetado deve, tendo em vista reduzir os custos decorrentes do consumo de energia, interagir ao nível do projeto de conceção do edifício, visando a criação ao nível do projeto, de condições propiciadoras da existência de iluminação natural, no maior número possível de locais, referindo-se a título de exemplo Keyvanfar (2014).

Muitos dos trabalhos abordam a integração da luz natural com a iluminação artificial, como uma das principais estratégias responsáveis pelo aumento da eficiência energética nos sistemas de iluminação.

Segundo Kamarulzaman (2011) o consumo global de energia nos edifícios comerciais e residenciais tem vindo a aumentar cerca de 20% a 40%. Ainda segundo o mesmo autor, os consumos de energia dependem do tipo do edifício, da utilização da luz natural, dos níveis de iluminação por tipo de áreas e horários de funcionamento do edifício.

Tal como referido por Burman (2014) na União Europeia o consumo de energia elétrica associado ao edificado é de cerca de 40% do consumo total e representam cerca de 36% as correspondentes de emissão de CO₂. Revela-se assim, como elemento chave a criação de uma estratégia de eficiência energética objetivo que persegue a publicação da Diretiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro.

A adoção de tecnologias energeticamente eficientes não deve pôr em causa o conforto, a saúde, o bem-estar, o desempenho e a satisfação do trabalhador, embora, segundo Veitch (2013) é difícil propor um cenário luminoso que satisfaça a mais de 50% dos ocupantes. Segundo este autor, o conforto e a produtividade dos trabalhadores estão interligados com os níveis de iluminação, porque a maior parte de informação que um trabalhador necessita é conseguida através da visão.

Como tal, a adequação da iluminação ao trabalhador-posto de trabalho deve proporcionar o máximo de segurança, prevenir acidentes e doenças ocupacionais, reduzir a fadiga ocular e geral.

Kumpeerakupt (2012) em estudo de sistema de *retrofit* T5 ou *LED* em alternativa a sistema T8 existente, salienta os cerca de 50% de poupança energética, bem como, a significativa redução de taxa CO₂, daí resultantes. O mesmo autor aponta naquele seu trabalho, valores exatáveis de *payback* de respetivamente 5,68 anos para T5 e de 1,12 anos para *LEDs*. Salienta-se por relevante que aquele estudo aponta como solução num e noutro caso, a técnica *retrofit* de simples substituição das lâmpadas T8 por lâmpadas T5 ou *LEDs*.

No atual estado de arte, a tecnologia de iluminação baseada em *LEDs*, relativamente recente comparativamente com as mais tradicionais formas de iluminação incandescente, halogénea ou de descarga, é apontada por muitos autores, como por exemplo Vitor (2014) como resposta à crescente necessidade de solução das muitas questões ambientais, que hoje urge resolver satisfatoriamente, como por exemplo a exatável redução da emissão de CO₂.

Neste momento, as lâmpadas *LED* são muito divulgadas comercialmente. É uma tecnologia em desenvolvimento, em que o investimento é elevado.

Dos vários estudos realizados, subsiste alguma controvérsia na comunidade científica a propósito da substituição das lâmpadas fluorescentes T8 por *LEDs*. Tal como referem Ryckaert (2012) e Gan (2013), às inegáveis vantagens de menor consumo energético, alta eficiência luminosa, etc contrapõem-se entre outras desvantagens, a nefasta influência nas redes, a taxa de distorção

harmónica (THD) produzida na rede elétrica (que é elevada nesta tecnologia), referem-se a pior performance das lâmpadas *LEDs* face às lâmpadas fluorescentes T5 em termos da eficácia luminosa e produção de calor, conforme Qin (2009). Segundo o mesmo autor, as lâmpadas fluorescentes T5 e T8 dissipam 73% – 77% da sua potência total em calor e os *LEDs* apresentam valores de 87% -90% para o mesmo parâmetro.

A longa vida útil de tipicamente (3 a 5 anos) e a elevada eficiência traduzida no rácio lumens/watts são alguns dos argumentos invocados a favor da tecnologia *LED*, conforme Koh (2011).

Não menos irrelevante é a questão do preço de aquisição dos *LEDs* significativamente mais caros, do que os relativos às outras tecnologias, nomeadamente lâmpadas fluorescentes, tal como refere entre outros fatores Cowan (2011), cenário que apesar dos quatro anos já decorridos, ainda se mantém.

Paralelamente ao referido, cita o mesmo autor, como vantagens dos *LEDs* é a baixa toxicidade por ausência de mercúrio habitualmente presente nas lâmpadas de descarga, a ciclicidade que permite ciclos de acendimento e apagamento sem afetar a vida útil dos *LEDs* ao contrário ao que ocorre nas lâmpadas de descarga.

Particularidade relevante na situação de *retrofit* de lâmpada T8 por *LED* ocorre, tal como refere Ryckaert (2012), porquanto *LED* emite luz no seu hemisfério inferior ao contrário das fluorescentes tubulares T8 ou T5 que emitindo luz de forma omnidirecional tirando portanto pleno partido do sistema ótico da luminária onde estão instaladas. No mesmo estudo, refere o autor o facto do generalizado descontentamento da maioria dos utilizadores dos espaços, no tocante à qualidade da iluminação resultante da *retrofit* T8 por *LED*.

3 OBJECTIVOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Consciente da realidade e da importância de que se reveste hoje a redução da fatura energética associada aos consumos de iluminação, no quadro da conjuntura económica fortemente restritiva que atravessamos, a implementação de sistemas de iluminação eficientes em edifícios existentes passa pela necessidade de modificações ou reformas nas instalações. Isto é conseguido pela substituição de componentes obsoletos por outros energeticamente mais eficientes, integração da luz natural com a artificial e modificação no comando dos sistemas, incorporando sensores e redistribuindo circuitos de iluminação.

3.1 Objetivo do Trabalho

3.1.1 Objetivo Geral

Consiste em eleger a melhor solução luminotécnica de sistemas de iluminação, entre as duas tecnologias (T5 e *LEDs*), baseados em luminárias equipadas com balastros eletrónicos e com lâmpadas fluorescentes tubulares T8, T5 e *LEDs*, em ambiente de escritório, que alie a vertente económica à garantia de conforto visual e eficiência luminosa, que proporcionem aos utilizadores as melhores condições de segurança, saúde e bem-estar nos locais de trabalho.

3.1.2 Objetivos Específicos

Outros objetivos, assentam fundamentalmente em levantar toda a área em estudo, com vista a determinar a localização exata dos pontos de luz existentes, do tipo de instalação e proceder à realização de um novo projeto, tendo em atenção o estudo da viabilidade técnico-económica e eficiência energética, comparando duas tecnologias distintas:

- Hipótese 1- luminárias com lâmpadas fluorescentes tubulares T5;
- Hipótese 2- luminárias com lâmpadas *LEDs*.

Em substituição da iluminação existente, assegurada por luminárias com lâmpadas fluorescentes tubulares T8. Sendo um facto que a condição existente (lâmpadas T8) não garante alguns dos requisitos exigíveis para um moderno sistema de iluminação, comprometendo em particular o aspeto económico, pretende-se que uma das soluções alternativas estudadas assegure desempenho luminoso adequado à atividade a executar, aliado a um elevado desempenho energético e baixos custos de exploração/manutenção, tendo por base o seguinte:

- Avaliar o sistema de iluminação atual;
- Dimensionar um sistema de iluminação mais eficiente;
- Analisar os parâmetros luminotécnicos;
- Executar a análise técnico-financeira.

3.2 Caraterização do edifício em estudo

O edifício em estudo, de uma determinada empresa existente na zona norte de Portugal, ocupa uma área térrea de 24.375m², é composto por áreas de funcionamento do tipo:

- Administrativo, constituído por diversos pisos, no total de 3, mais cave e cobertura, totalizam uma área de 2.910m²;
- E industrial com uma área de 8.200,6m².

A fachada lateral e frontal é envidraçada, com janelas em toda extensão, com as dimensões de 1,00 m de largura e 1,5m de altura, peitoril de 0,1m, onde são usadas estores para proteção solar.

Na área administrativa, o piso da cave é composto essencialmente por arquivos e armazéns. Os restantes pisos são de forma genérica semelhantes, compostos por postos de trabalho em “*open space*”, salas de reunião, gabinetes individuais, arquivos, zonas de circulação e instalações sanitárias, conforme plantas no Anexo A.

3.3 Metodologia

A metodologia a ser aplicada, passa pelo dimensionamento e instalação de um novo conjunto de luminárias mais eficientes. Para o efeito foi compulsada e sistematizada informação sobre o tema através de revisão de bibliográfica do estado de arte da tecnologia de iluminação, consultado o mercado na busca de oferta de soluções e reunidas as informações necessárias para que fosse possível comparar o desempenho energético, os consumos energéticos e custos económicos nos dois cenários – o existente e o proposto, para discutir os benefícios que poderão advir desta remodelação.

Resultou assim, dos elementos escolhidos da revisão sistemática e consulta efetuada ao mercado junto das principais firmas comercializadoras de soluções luminotécnicas, a definição dos materiais e métodos aplicáveis, à frente explicado.

No prosseguimento e de acordo com o método definido, procedeu-se à recolha de dados do sistema de iluminação existente e simulou-se um novo projeto de iluminação.

Por último trataram-se e analisaram-se os resultados obtidos.

A metodologia segue o esquema da Figura 11, onde resumidamente é descrito o plano de ação utilizado para o desenvolvimento do caso em estudo.

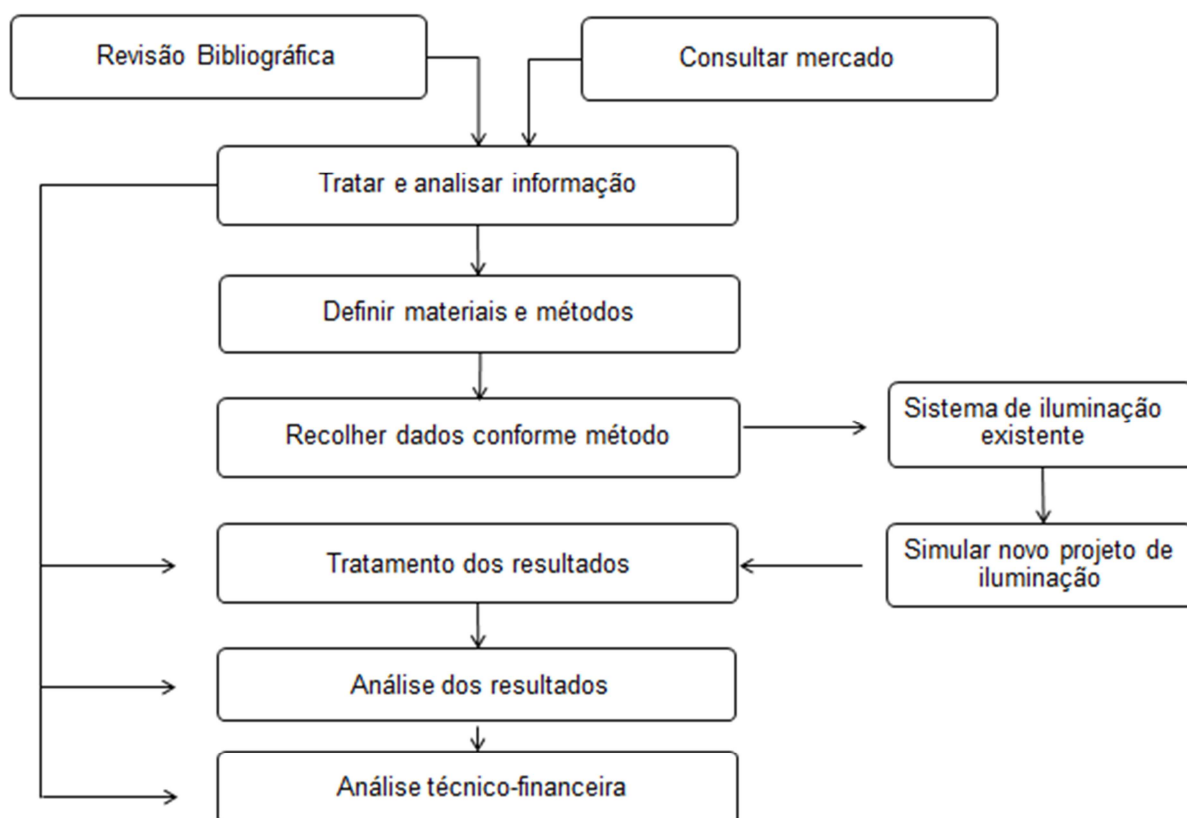


Figura 11 - Fluxograma da metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo.

3.4 Materiais

A caracterização dos locais de trabalho em estudo foi feita por observação direta no local, com recurso a uma máquina fotográfica e a uma folha de papel para registo de aspetos luminotécnicos gerais dos locais: o tipo de iluminação, características das luminárias, lâmpadas, janelas, o posicionamento dos postos de trabalhos em relação ao plano de trabalho, entre outras.

A medição dos níveis de iluminação nos planos de trabalho foi realizada com recurso a um **luxímetro**, da marca GOSSEN, modelo MAVOLUX 5032C USB, conforme manual de instruções anexo, calibrado pela última vez em 30-10-2014 pelo Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), com certificado nº COPT693/14. É um instrumento de leitura direta, constituído por uma célula fotoelétrica (sensor de luz), ver Figura 12, cuja função consiste em medir a intensidade luminosa proveniente de fontes naturais ou artificiais. O erro admissível nos valores obtidos no luxímetro cumpre a norma DIN 5032-7 e DIN EN 13032-1 (2012). A unidade utilizada para obtenção do valor da iluminância foi o Lux. Para o estudo aqui tratado, revelou-se necessário por sala, a elaboração de uma matriz de pontos para registo dos valores medidos, conforme patente na Figura 20. Os valores obtidos encontram-se no “Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO”, onde com recurso ao Excel foi possível tratar e analisar os mesmos.



Figura 12 - Luxímetro (Fonte: manual de instruções).

O *DIALux*, versão 5.5.0 (64 bits) da empresa *DIAL GmbH*, foi uma das ferramentas usadas no cálculo de iluminação, que permitiu comparar as diferentes hipóteses formuladas nos objetivos deste trabalho. O critério da escolha deste programa assentou na permissão de o mesmo permitir simular a influência da luz solar nas salas em estudo. Através do cálculo e da elaboração de imagem, foi possível o estudo da iluminação das salas em estudo, relacionando a iluminação projetada e as características do espaço, permitindo compreender qual a dependência entre a qualidade técnica e o conceito de iluminação utilizado, bem como as consequências de alteração de características das luminárias ou do espaço em estudo.

A análise dos valores calculados foi realizada através de três mapas fornecidos pelo *DIALux*, referente a cada espaço:

- Planta de valores, com a distribuição pontual dos níveis de iluminação (lux);
- Planta dos níveis de tons ou cores permitindo análise dos níveis de iluminação;
- Planta das linhas isográficas, que permite análise dos níveis de iluminação.

Na Figura 13, apresenta-se a interface de entrada de dados desta aplicação informática.

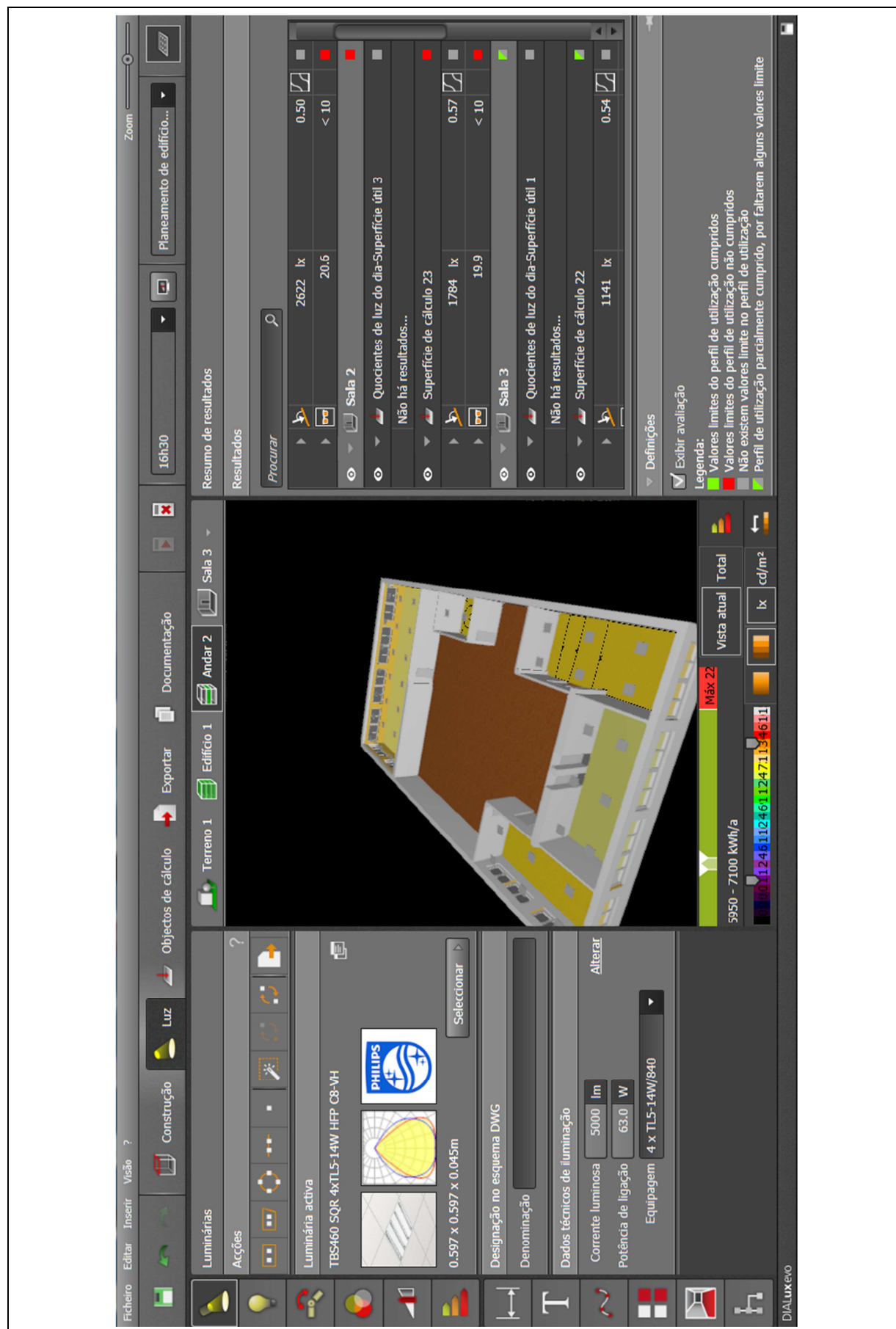


Figura 13 - Interface de entrada de dados no programa *DIALux EVO* versão 5.5.0.

3.5 Métodos

3.5.1 Seleção da amostra

O presente trabalho incide no estudo da solução de iluminação adequada à área administrativa, de forma a se avaliar as condições de iluminação, que permitam comparações dos sistemas à base de lâmpadas fluorescentes nos tipos T8, com as alternativas T5 e a mais recente tecnologia *LED*.

Definiram-se como protótipos, cinco gabinetes localizados no 2º andar, podendo os resultados serem extrapolados para os restantes pisos, com diferentes orientações dos ambientes Figura 14 e a seguir discriminados:

- i) *Open space*, com exposição solar em duas fachadas, a oeste e a sul (sala 1);
- ii) *Open space*, com exposição solar, na fachada virada a sul (salas 2 e 3);
- iii) Gabinete individual, sem qualquer exposição solar (sala 4);
- iv) *Open space* com exposição solar em duas fachadas, sendo uma orientada a norte e outra a oeste (sala 5).

A escolha de ambientes em cada orientação visa analisar as formas de incidência de luz natural e as diferenças entre os valores de iluminância.

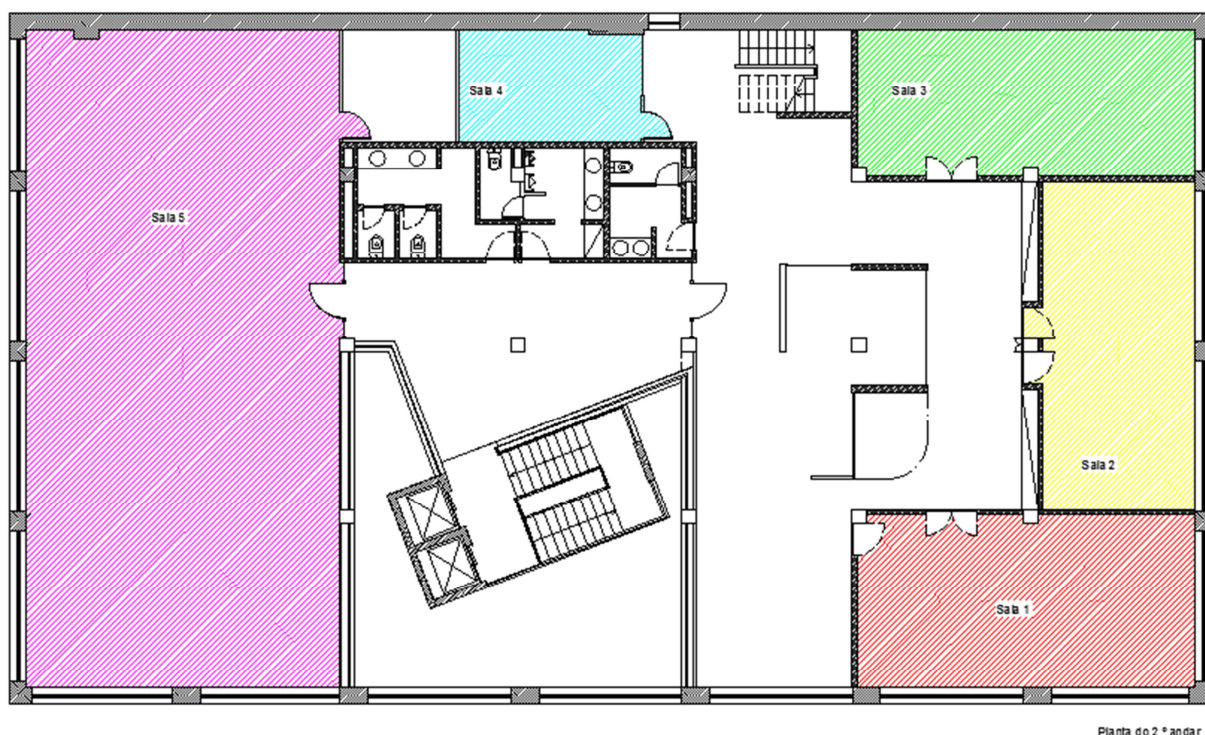


Figura 14 - Planta das salas em estudo no 2º andar.

As cores adotadas nos ambientes internos, conforme pode ser visualizado nas Figuras 15, 16, 17, 18 são:

- Teto branco;
- Paredes em cinza claro, exceto na sala 5 em que a cor adotada é amarela;

- Pavimento em madeira acastanhada, exceto na sala 5, em que o pavimento é em linóleo amarelado.



Figura 15 - Sala 1.



Figura 16 - Sala 3.



Figura 17 - Sala 4.



Figura 18 - Sala 5.

Para além do já descrito, foram também consideradas e levantadas as dimensões das salas em estudo, encontrando-se discriminadas na Tabela 3, onde C é o comprimento da sala e L a largura.

Tabela 3 - Características das salas em estudo.

Salas	Dimensão		Área (m ²)	Índice reflexão			
	C (m)	L (m)		Teto	Pavimento	Paredes	Vidro
1	9,88	5,04	49,8	0,703	0,152	0,861	0,100
2	9,58	4,57	43,8				
3	9,88	4,30	42,5				
4	5,25	3,30	17,3				-
5	19,25	9,17	176,5	0,703	0,612	0,678	0,100

O sistema de iluminação existente é, na sua maioria, constituído por luminárias encastradas no teto falso.

A análise do desempenho do sistema de iluminação foi realizada, com recurso à norma EN 12464-1 (2002) e a um conjunto de relações, que permitem determinar a eficiência energética ou

rendimento luminoso (lm/W) do sistema de iluminação instalado, tendo em conta a eficiência da ótica, do balastro e da lâmpada.

A avaliação do estado de operacionalização do sistema de iluminação instalado, foi realizado por comparação dos valores obtidos pelo programa *DIALux* e dos valores medidos pelo luxímetro.

O *DIALux* foi o recurso utilizado para analisar quantitativa e qualitativamente a melhor das duas hipóteses descritas nos objetivos deste trabalho (viabilidade de instalação de lâmpada T5 ou LED em substituição da lâmpada fluorescente convencional T8 existente), por forma, que satisfaça as premissas das quantidades fotométricas requeridas pela norma, aliadas ao conforto, eficiência energética e respeito ambiental, visando a racionalização no uso de energia elétrica.

Adicionalmente foram consideradas as questões económicas envolvidas na aplicação da tecnologia proposta, mais particularmente os custos da manutenção, substituição de lâmpadas e equipamentos, vida útil dos equipamentos, custo inicial dos mesmos, etc., para quantificação dos benefícios económicos da solução preconizada, com vista a estimar a relação custo- benefício do investimento e período de retorno do mesmo.

Outras análises qualitativas foram consideradas como:

- A sensação de melhoria na qualidade da luz e a percepção de melhoria da segurança;
- Questões como temperatura e índice de restituição de cor estão diretamente relacionados com os estímulos visuais percebidos pelo indivíduo, razão pela qual foram elemento preponderante na seleção das lâmpadas T5 e LED, a utilizar.

3.5.2 Medições

Na zona em estudo, referenciados na planta do 2º andar como sala 1, sala 2, sala 3, sala 4 e sala 5, foi realizado um levantamento e caracterização da situação existente, relativos às condições de acesso para executar medições das quantidades fotométricas, características do espaço e do sistema de iluminação, quantidade de luminárias e posicionamento no espaço, marca e modelo das luminárias, potência instalada, tecnologia usada e consumo energético do atual sistema de iluminação.

Paralelamente às medições de consumo, foram recolhidos os dados fotométricos com recurso a um luxímetro e aplicado o **método das iluminâncias médias**. Os ambientes foram divididos em áreas iguais e no centro de cada uma, foram feitas aferições do valor da iluminância, conforme Figura 20. As diversas medições de campo, foram executadas ao longo do dia, em ambiente com influência da iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N), da iluminação natural (N) e ambiente protegido da irradiação solar, nos horários 10h, 12h, 16:30h e à noite. Para a medição exclusivamente da iluminação artificial (A), as aferições de iluminância ocorreram à noite.

Os níveis de iluminância produzidos pelo atual sistema de iluminação foram registados numa folha de cálculo em *EXCEL* visando comparações qualitativas e quantitativas com homólogos resultados dos sistemas alternativos a projetar e bem assim comparar dados relativos a consumos energéticos atuais e das soluções nas alternativas propostas.

Para ao nível de medições recriar condições idênticas às simuladas pelo *DIALux*, as medições efetuadas durante o dia, foram realizadas com os estores abertos.

A determinação da quantidade mínima de pontos necessários para aferir o nível de iluminância é conforme recomendações internacionais, conseguida através do cálculo do índice do local (K) pela seguinte Equação 1. Com base na Tabela 4, foram calculados a quantidade mínima de

pontos de referência e a respetiva matriz a implementar em cada sala em estudo, conforme Tabela 5.

$$K = \frac{C \times L}{H_m \times (C + L)}$$

Equação 1 - Índice do local

Onde:

C - comprimento do ambiente (m);

L - largura do ambiente (m);

K - índice do local;

H_m - distância vertical entre a superfície de trabalho e a luminária (m).

Tabela 4 - Quantidade mínima de pontos de referência a serem medidos.

K < 1	9
1 ≤ K < 2	16
2 ≤ K < 3	25
K > 3	36

Fonte: NBR 15215-4 (ABNT, 2005)

Tabela 5 - Número de Pontos calculados para medição da iluminância.

Salas	Comprimento (m)	Largura (m)	Índice do local K	Nº de Pontos	Matriz
1	9,88	5,04	1,7	16	4x4
2	9,58	4,57	1,5	16	4x4
3	9,88	4,30	1,5	16	4x4
4	5,25	3,30	1,0	16	4x4
5	19,25	9,17	3,1	36	6x6

Nas salas 1, 2, 3, 4 foram determinados 16 pontos, enquanto na sala 5 foram determinados 36 pontos, assinalados na Figura 19 com uma cruz verde cujas coordenadas dos pontos estão no Anexo B.

Quando ao longo deste trabalho se refere iluminância média de vários pontos, sintetiza-se o valor que resulta do cálculo do quociente entre o somatório das iluminâncias desses pontos e o número dos mesmos, conforme a Equação 2.

$$E_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{med_i}}{n}$$

Equação 2 - Iluminância média

De forma análoga, a referência aos valores de uniformidade reflete o cálculo do quociente entre a iluminância mínima e a iluminância média, conforme Equação 3.

$$U_o = \frac{E_{min}}{E_{med}}$$

Equação 3 - Uniformidade

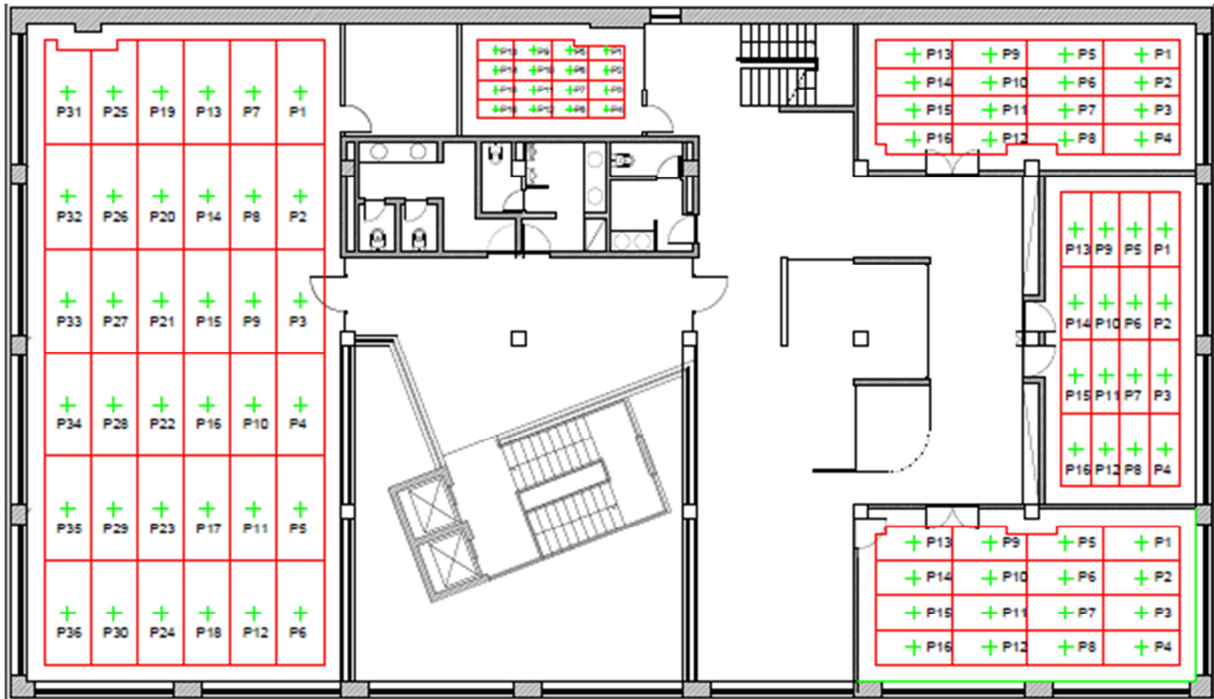


Figura 19 - Matriz de referência dos pontos a medir com luxímetro por sala de estudo.

A Figura 20 ilustra uma medição da iluminância efetuada com o luxímetro num desses pontos.



Figura 20 - Medição da iluminância com o luxímetro na sala 5.

PARTE 2 – ANÁLISE LUMINOTÉCNICA

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na aplicação da metodologia proposta, procedeu-se ao levantar do existente e analisar as duas hipóteses em que assentam este trabalho:

- Hipótese 1 - Proposta de melhoria a realizar - luminárias com lâmpadas fluorescentes tubulares T5;
- Hipótese 2 - Proposta de melhoria a realizar - luminária com lâmpadas leds.

4.1 Situação atual (T8)

O levantar do existente, decorreu nos dias 13 e 14 de Abril de 2015 em várias etapas, envolvendo observação das características físicas dos locais de trabalho, do tipo de luminárias e seus refletores, tipo de lâmpadas e potência, distribuição das luminárias, medição dos níveis de iluminação, consumo energético, assim como a quantidade de luminárias em cada sala. Foi identificado, que o nº médio de utilização diária é de 8h.

Tendo em conta a realidade existente, incluindo o mobiliário e outros objetos, procedeu-se à análise individual do sistema de iluminação de cada sala. Todos os espaços estão equipados com luminárias encastradas em teto falso para lâmpadas T8, da firma *PHILIPS*, referência *Impala TBS160 4xTL-D18W HF C3*, de dimensões 596 x596x80mm (Comprimento x Largura x Altura), conforme Figura 21.

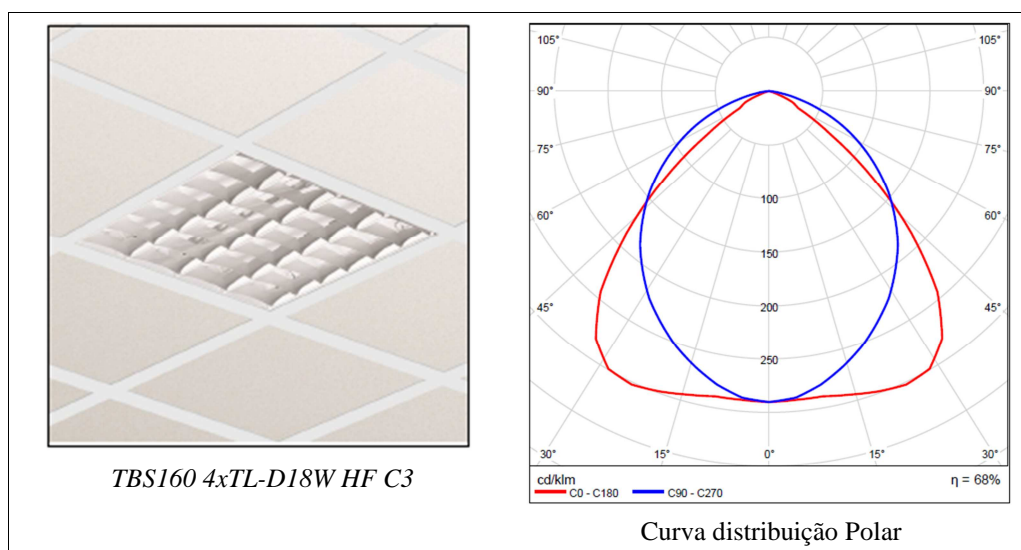


Figura 21 - Luminária com T8 existente e curva distribuição polar (Fonte: *Philips*, 2015).

O refletor em alumínio de alto brilho e lamelas planas em alumínio mate, de quatro lâmpadas fluorescentes tubulares, tipo TLD T8 de 18W, com IRC=80 e TC= 4000 K, fluxo luminoso da lâmpada é de 5.400 lm e da luminária 3661 lm, potência 69,5W, rendimento luminoso 52,7lm/W, cuja ficha técnica está no Anexo D.

As medições foram executadas, com os estores abertos, segundo um plano horizontal a uma altura de 0,80m do nível do piso, sendo considerado o fator de manutenção igual a 0,80.

A análise luminotécnica foi efetuada para cada sala da área em estudo, com medições em campo com recurso a um luxímetro no levantar do existente e paralelamente por recurso ao programa *DIALux*.

4.1.1 Valores medidos com luxímetro

De forma a não tornar exaustivo o conteúdo deste trabalho, apresentam-se seguidamente a título exemplificativo, os níveis de iluminação medidos com o luxímetro, para a matriz de pontos na sala 1, de forma à compreensão do estudo feito. Os resultados individuais das restantes salas estão patentes no Anexo B.

4.1.1.1 Sala 1

Com base na matriz dos pontos (4x4) anteriormente calculados e mostrados na Figura 19, apresentam-se na Tabela 6 os valores dos níveis de iluminação medidos com o luxímetro nos diversos horários, com iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N) e na Tabela 7 com iluminação natural (N).

Tabela 6 - Níveis de iluminação **A+N**, com T8 na sala 1.

Iluminância – medida com Luxímetro				
Pontos	10h	12h	16:30h	Noite
P1	1330	1548	1902	448
P2	1710	2083	1968	455
P3	2000	2307	2410	444
P4	2495	2830	3869	472
P5	925	965	1540	458
P6	942	1001	1561	464
P7	1110	1190	1588	460
P8	1521	1738	3244	498
P9	773	789	1402	455
P10	809	829	1480	460
P11	998	1038	1995	453
P12	1468	1652	3668	494
P13	700	712	1357	428
P14	740	769	1402	437
P15	892	950	1813	426
P16	1324	1517	3241	491
E med	1234	1370	2153	459

Tabela 7 - Níveis de iluminação **N**, com T8 na sala 1.

Iluminância – medida com Luxímetro				
Pontos	10h	12h	16:30h	Noite
P1	882	1100	1454	0
P2	1255	1628	1513	0
P3	1556	1863	1966	0
P4	2023	2358	3397	0
P5	467	507	1082	0
P6	478	537	1097	0
P7	650	730	1128	0
P8	1023	1240	2746	0
P9	318	334	947	0
P10	349	369	1020	0
P11	545	585	1542	0
P12	974	1158	3174	0
P13	272	284	929	0
P14	303	332	965	0
P15	466	524	1387	0
P16	833	1026	2750	0
E med	775	911	1694	0

Os valores da iluminância média, mínima e máxima, medidos com o luxímetro, são apresentados na Tabela 8, respetivamente para o caso de iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N) e iluminação natural (N).

Tabela 8 - Valores medidos com luxímetro na sala 1, com T8.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	1234	700	2495	775	272	2023
12h	1370	712	2830	911	284	2358
16:30h	2153	1357	3869	1694	929	3397
Noite	459	426	498	0	0	0

4.1.1.2 Sala 2

Na Tabela 9, apresentam-se os valores da iluminância média, mínima e máxima, medidos com o luxímetro, com iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N) e com luz natural (N).

Tabela 9 - Valores medidos com luxímetro na sala 2, com T8.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	1392	929	2435	911	420	1962
12h	1611	1133	2621	1131	624	2148
16:30h	1422	996	2306	941	485	1828
Noite	480	452	515	0	0	0

4.1.1.3 Sala 3

De modo análogo, apresentam-se na Tabela 10 os valores da iluminância média, mínima e máxima, medidos com o luxímetro, para iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N) e iluminação natural (N).

Tabela 10 - Valores medidos com luxímetro na sala 3, com T8.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	860	503	1614	326	27	1094
12h	964	601	1854	427	77	1334
16:30h	845	514	1628	310	2	1100
Noite	537	494	572	0	0	0

4.1.1.4 Sala 4

Na Tabela 11, apresentam-se os valores da iluminância média, mínima e máxima, medidos com o luxímetro, com iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N) e com luz natural (N).

Tabela 11 - Valores medidos com luxímetro na sala 4, com T8.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	655	640	674	0	0	0
12h	655	640	674	0	0	0
16:30h	655	640	674	0	0	0
Noite	655	640	674	0	0	0

4.1.1.5 Sala 5

Os valores da iluminância média, mínima e máxima, medidos com o luxímetro são apresentados na Tabela 12, com iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N) e com luz natural (N).

Tabela 12 - Valores medidos com luxímetro na sala 5, com T8.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	1392	1027	2118	631	255	1487
12h	1322	992	2005	561	220	1374
16:30h	1666	1084	3124	904	313	2493
Noite	761	631	836	0	0	0

4.1.2 Simulado no *DIALux*

Dos três mapas de iluminância obtidos no *DIALux*, optou-se pelo mapa de cores, porquanto de mais fácil e intuitiva percepção das nuances dos níveis de iluminação em cada local. Os resultados exaustivos obtidos para cada sala em estudo e os mapas respetivos podem ser consultados no Anexo D.

4.1.2.1 Sala 1

O programa *DIALux* permite simular a distribuição das luminárias na sala, conforme Figura 23, bem como apresentar uma visão tridimensional da sala, com o mobiliário, as luminárias existentes e a influência da luz natural dependente dos vários horários de medição. A Figura 22 é um exemplo disso, mostra uma visão tridimensional do gabinete.

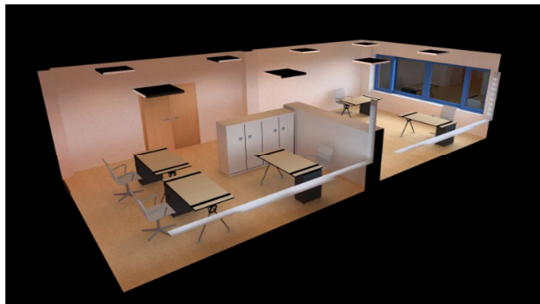


Figura 22 - Simulação no *DIALux*, às 16:30h na sala 1.

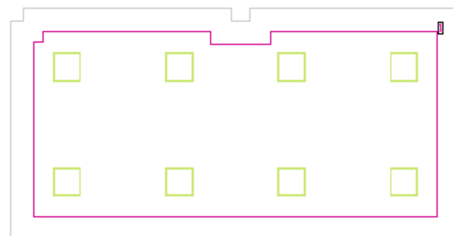


Figura 23 - Planta da sala 1 e as posições das luminárias.

A representação gráfica dos valores da distribuição do nível de iluminação no plano trabalho, nos diferentes horários é apresentada nos mapas cromáticos na Figura 24, com **iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N)**.

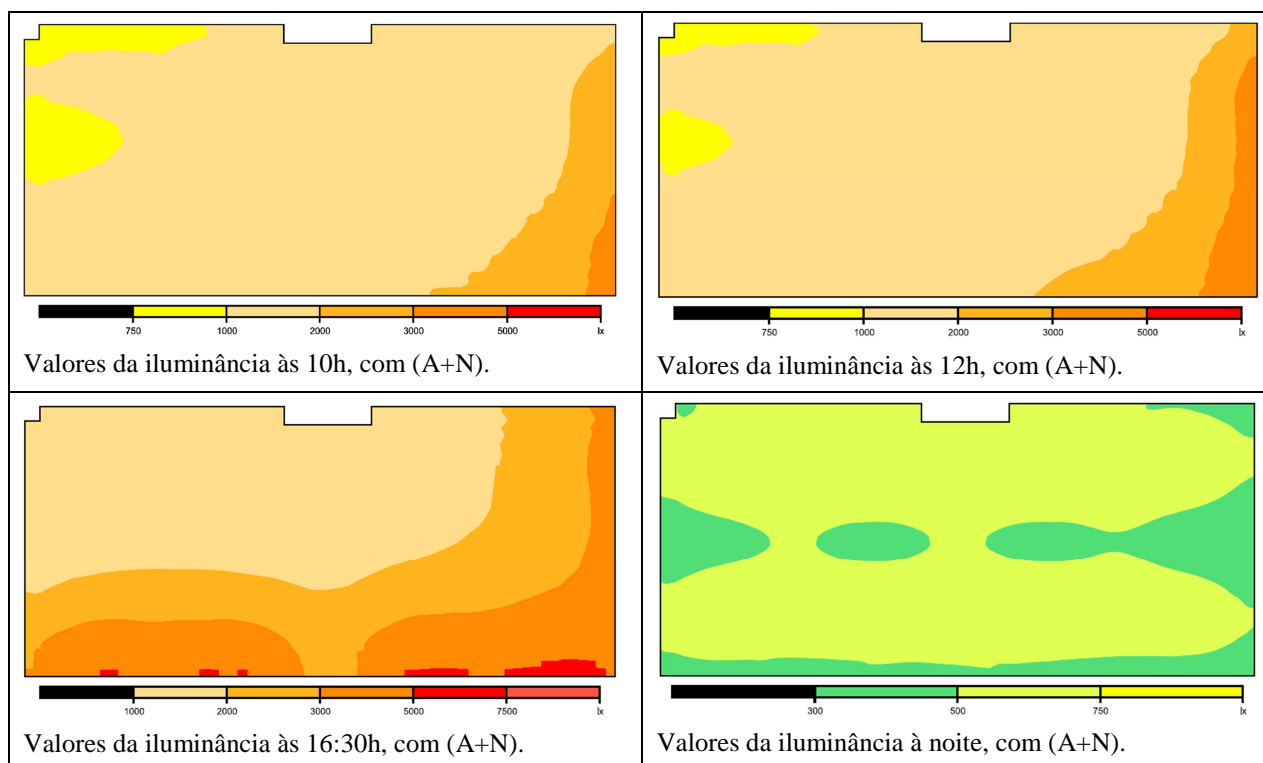


Figura 24 - Mapas cromáticos obtidos no *DIALux* para a sala 1, com T8.

Na Tabela 13 apresentam-se os valores das iluminâncias obtidos pelo *DIALux*, com T8, nos diversos horários, resultante de iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N) e de iluminação natural (N). Em tal Tabela, a iluminância média é designada por E_{med} , a iluminância mínima por E_{min} e a iluminância máxima por E_{max} .

Tabela 13 - Valores obtidos no *DIALux*, com T8 na sala 1.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	1435	920	3474	894	419	3086
12h	1551	945	4141	1010	436	3713
16:30h	2396	1363	5620	1855	853	5177
Noite	541	395	632	0	0	0

Os valores dos níveis de iluminação referentes à **iluminação artificial (A)**, são os patentes na Tabela 13, no horário Noite.

4.1.2.2 Sala 2

Na Figura 25 apresentam-se a planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 2, calculadas pelo *DIALux*.

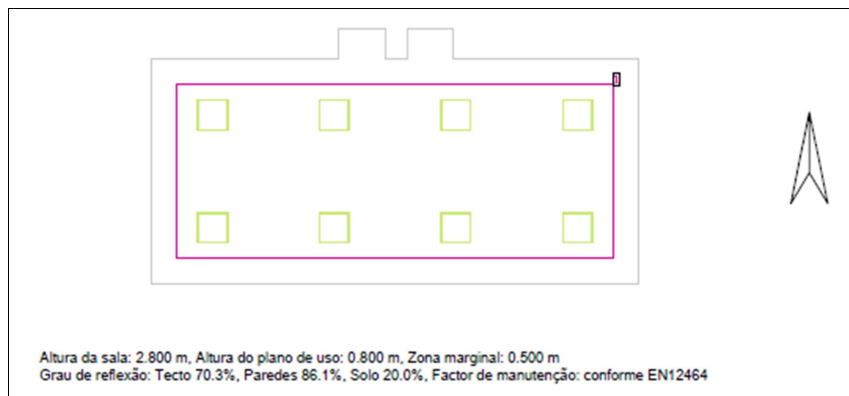


Figura 25 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 2.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, nos diferentes horários, com **iluminação artificial e natural em simultâneo**, são apresentados nos mapas cromáticos, na Figura 26. Os valores obtidos no *DIALux* nos diversos horários, apresentam-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores obtidos no *DIALux*, com T8 na sala 2.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	1593	1095	3224	990	520	2742
12h	1799	1202	3802	1196	623	3320
16:30h	1672	1132	3255	1070	550	2771
Noite	603	479	668	0	0	0

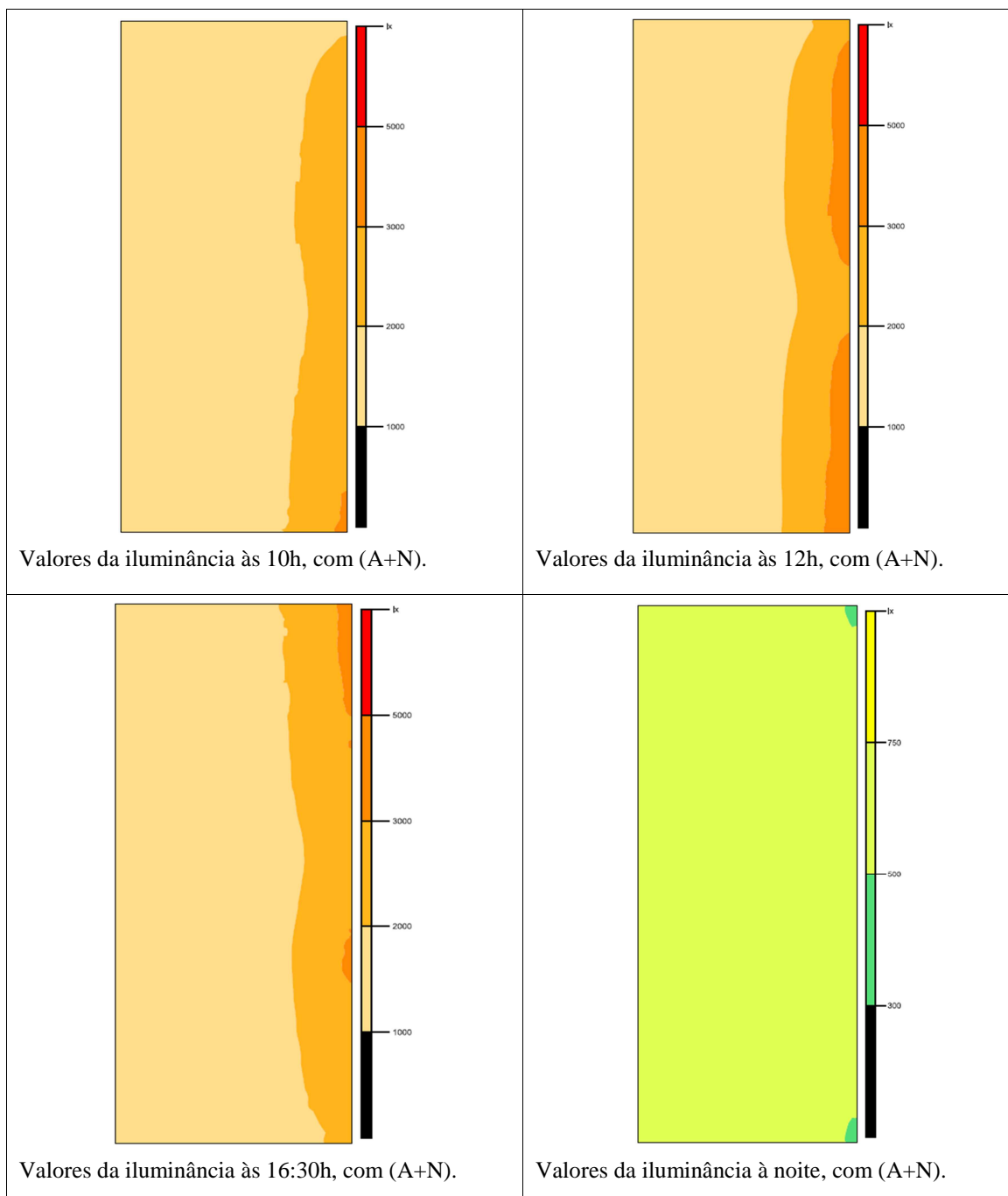


Figura 26 - Mapas cromáticos obtidos no *DIALux* para a sala 2, com T8.

4.1.2.3 Sala 3

A planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 3, calculadas pelo *DIALux*, é conforme apresentado na Figura 27.

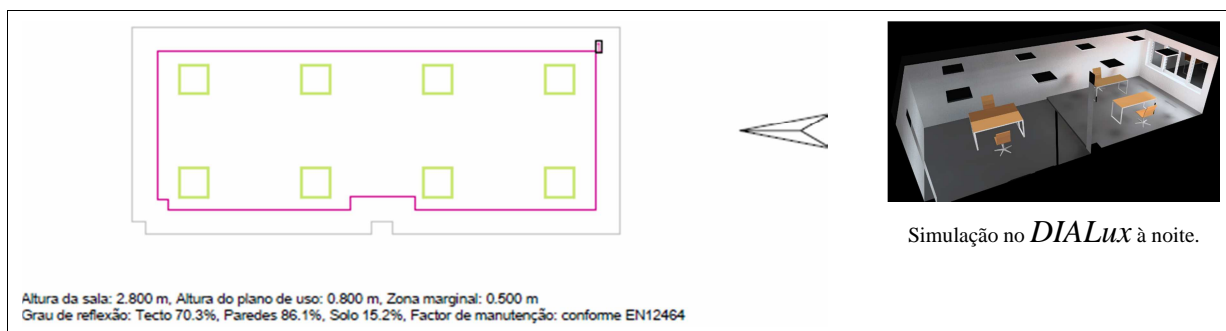


Figura 27 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 3.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, nos diferentes horários, com **iluminação artificial e natural em simultâneo**, são apresentados nos mapas cromáticos, na Figura 28.

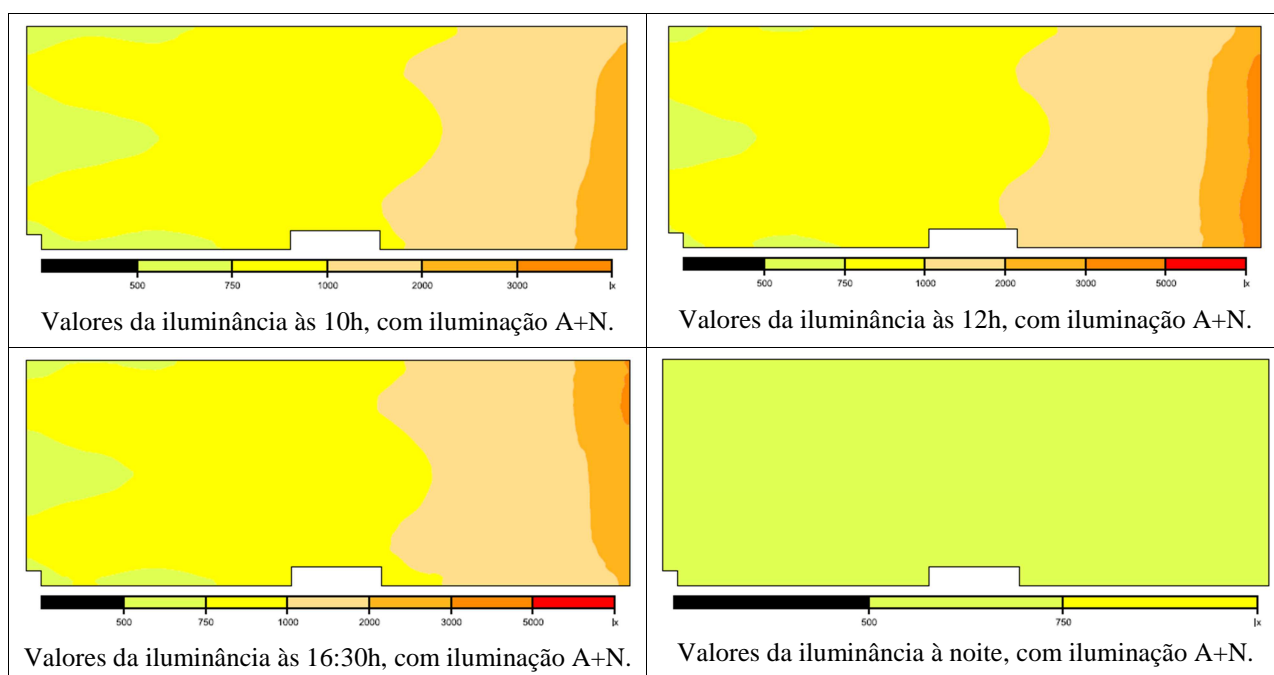


Figura 28 - Mapas cromáticos obtidos nos vários horários, na sala 3 com T8.

Os valores obtidos no *DIALux* nos diversos horários, apresentam-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores obtidos no *DIALux*, com T8 na sala 3.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	1057	683	2944	401	101	2418
12h	1149	704	3612	493	116	3025
16:30h	1093	694	3182	437	110	2585
Noite	656	524	719	0	0	0

4.1.2.4 Sala 4

Apresenta-se na Figura 29, a planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 4, calculadas pelo *DIALux*.

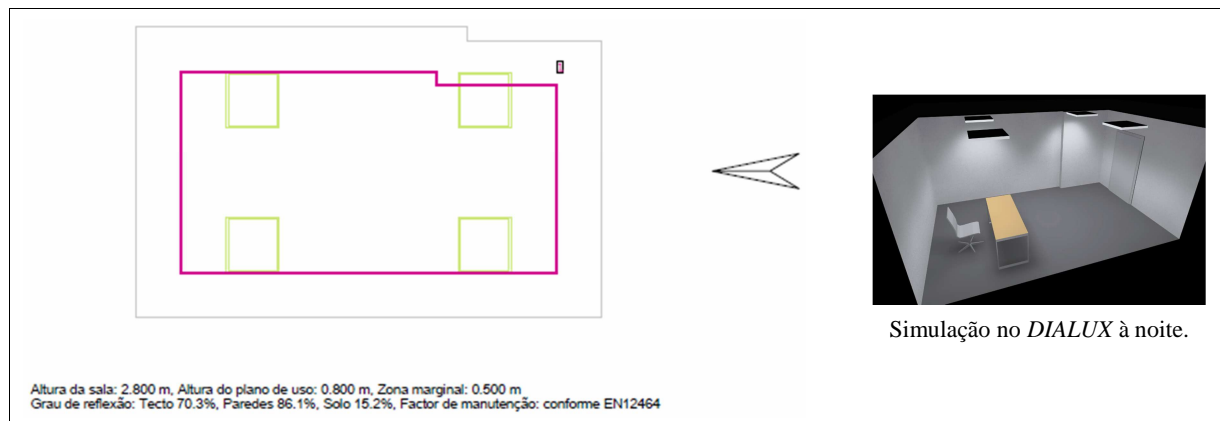


Figura 29 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 4.

Sala localizada no interior do edifício, sem influência de luz natural. A iluminação neste espaço é exclusivamente conseguidos através de iluminação artificial. Como os valores das iluminâncias são iguais nos diferentes horários, será apresentado apenas na Figura 30, o mapa cromático de um dos horários.

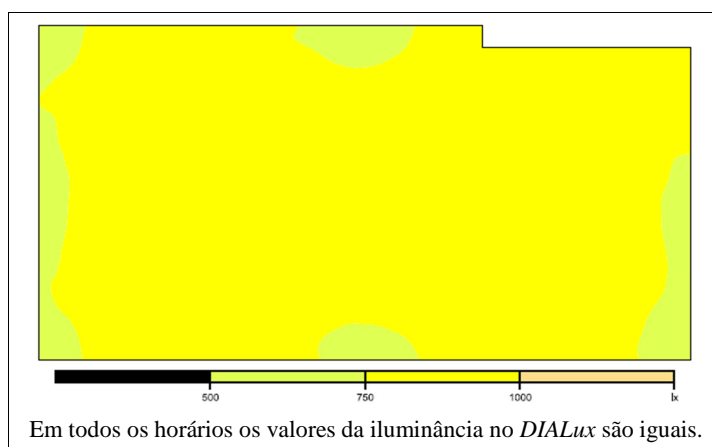


Figura 30 - Mapa cromático obtido na sala 4 com T8

Os valores das iluminâncias obtidos no *DIALux*, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores obtidos no *DIALux*, com T8 na sala 4.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	787	708	834	0	0	0
12h	787	708	834	0	0	0
16:30h	787	708	834	0	0	0
Noite	787	708	834	0	0	0

4.1.2.5 Sala 5

A planta da sala e a posição das luminárias na sala 5, calculadas pelo *DIALux*, é apresentado na Figura 31.

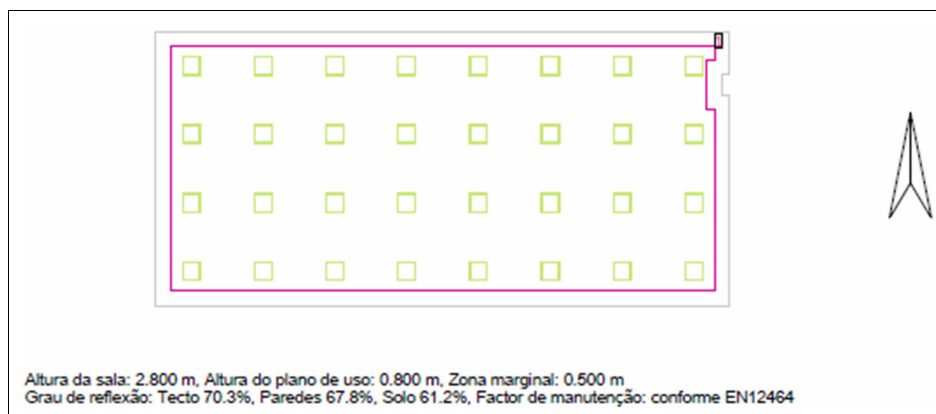


Figura 31 - Distribuição das luminárias com T8 na sala 5.

Na Figura 32 apresentam-se os mapas cromáticos dos valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, para os diferentes horários, com **iluminação artificial e natural em simultâneo**.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux* nos diversos horários, apresentam-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores obtidos no *DIALux*, com T8 na sala 5.

Horário	Iluminância – A+N			Iluminância - N		
	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)	<i>E med</i> (lux)	<i>E min</i> (lux)	<i>E max</i> (lux)
10h	1595	1110	3061	692	306	2466
12h	1563	1102	3034	661	298	2438
16:30h	1910	1191	6081	1008	378	5382
Noite	902	595	1027	0	0	0

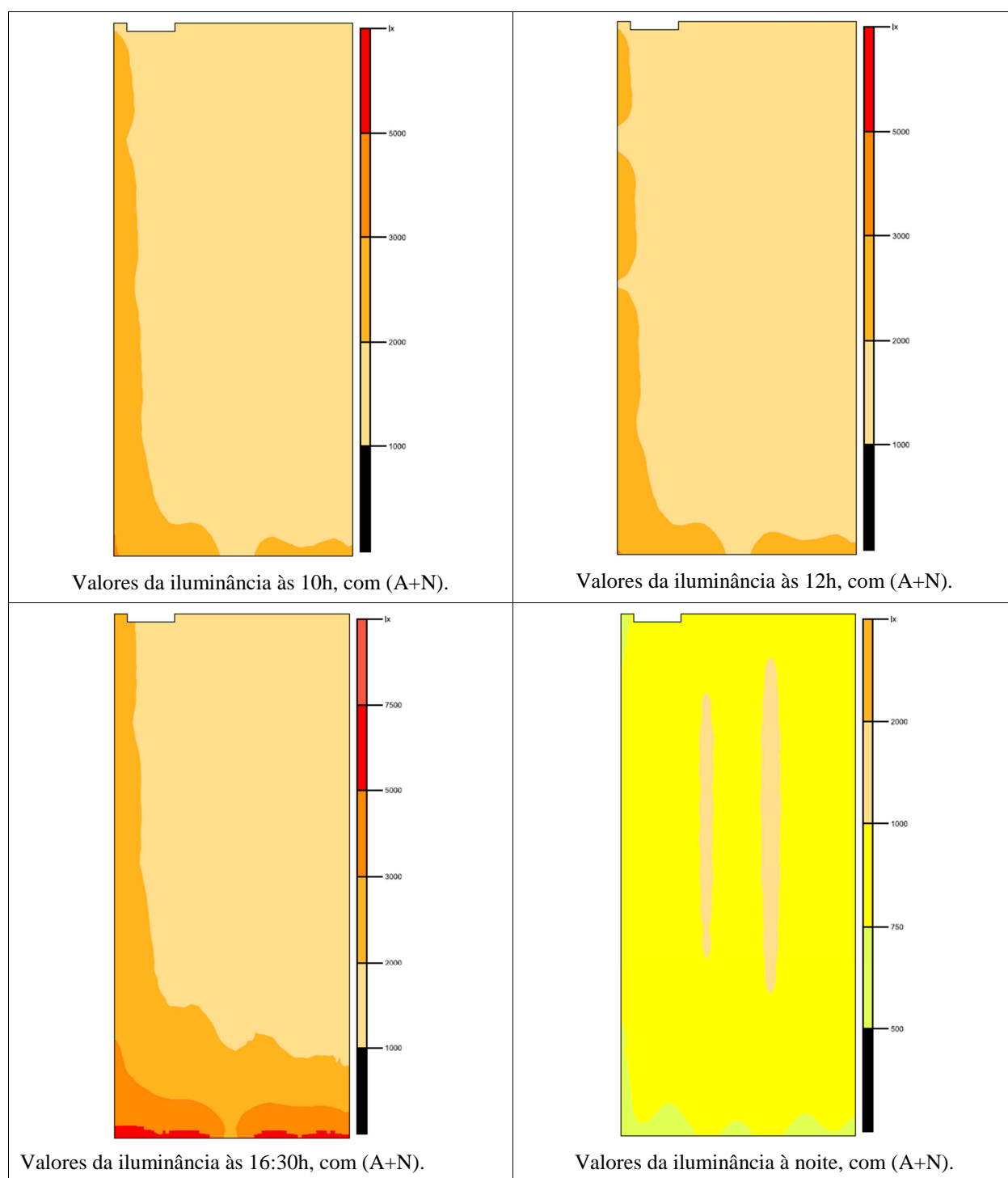


Figura 32 - Mapa cromático obtido na sala 5 com T8.

4.1.3 Análise Comparativa

O levantamento pormenorizado, incluindo a medição dos valores de iluminância em cada um dos pontos medidos com o luxímetro e o simulado no *DIALux*, poderá ser consultado nos Anexos B e D.

4.1.3.1 Iluminância

A Tabela 18 apresenta os valores das iluminâncias medidos com o luxímetro e calculado/simulado no *DIALux*, nas salas em estudo, com **iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N)**.

Tabela 18 - Avaliação comparativa da iluminância, com (A+N) e T8.

Salas	Iluminância Medida – E _{med} (lux)				Iluminância Simulada – E _{med} (lux)			
	10h	12h	16:30h	Noite	10h	12h	16:30h	Noite
1	1234	1370	2153	459	1435	1551	2396	541
2	1392	1611	1422	480	1593	1799	1672	603
3	860	964	845	537	1057	1149	1093	656
4	655	655	655	655	787	787	787	787
5	1392	1322	1666	761	1595	1563	1910	902

Os valores das iluminâncias medidos com o luxímetro e calculado/simulado no *DIALux*, nas salas em estudo, com **iluminação natural (N)**, apresentam-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Avaliação comparativa da iluminância, com iluminação (N) e T8.

Salas	Iluminância Medida – E _{med} (lux)				Iluminância Simulada – E _{med} (lux)			
	10h	12h	16:30h	Noite	10h	12h	16:30h	Noite
1	775	911	1694	0	894	1010	1855	0
2	911	1131	941	0	990	1196	1070	0
3	326	427	310	0	401	493	437	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	631	561	904	0	692	661	1008	0

Da análise das Tabelas 18 e 19, ressalta o seguinte:

1. De uma forma geral os valores medidos com o luxímetro são inferiores aos calculados pelo *DIALux*;
2. A iluminância média da iluminação artificial medida à noite com o luxímetro, apresenta nas salas 1 e 2, valores de 459 lux e 480 lux respetivamente, valores ligeiramente inferiores ao recomendado pela EN 12464-1 (2002), como já referido na Tabela 1;
3. Os valores de iluminância obtidos com a iluminação artificial e natural em simultâneo estão bastante acima do recomendado na norma EN 12464-1 (2002), o que se traduz num desperdício de energia;
4. É notória a influência da iluminação natural, onde existem vãos envidraçados, tornando dispensável o recurso à globalidade ou pelo menos, a parte significativa dos sistemas de

iluminação artificial, em tal situação. Naturalmente, esta influência é resultado direto da quantidade de luz natural existente e portanto, da época do ano de que se fala.

As duas primeiras situações são aceitáveis, a primeira explicada fundamentalmente pelo envelhecimento da maioria das luminárias e pela depreciação da iluminação produzida pelas lâmpadas, decorrente do envelhecimento das mesmas e da deposição de pó. A segunda, porquanto o valor em causa é mínimo e verifica-se em horário não condizente com o habitual horário de funcionamento do edifício.

4.1.3.2 Uniformidade

Apresenta-se na Tabela 20, os valores da uniformidade medidos com o luxímetro e calculado/simulado no *DIALux*, nas salas em estudo, com **iluminação artificial e natural em simultâneo** (A+N) e na Tabela 21 os valores obtidos com **iluminação natural** (N).

Tabela 20 - Avaliação comparativa da uniformidade, com (A+N) e T8.

Salas	Uniformidade Medida - Uo				Uniformidade Simulada - Uo			
	10h	12h	16:30h	Noite	10h	12h	16:30h	Noite
1	0,567	0,520	0,630	0,928	0,641	0,609	0,569	0,730
2	0,668	0,703	0,701	0,941	0,687	0,668	0,677	0,794
3	0,585	0,623	0,608	0,920	0,646	0,613	0,635	0,799
4	0,976	0,976	0,976	0,976	0,900	0,900	0,900	0,900
5	0,737	0,750	0,651	0,829	0,696	0,705	0,624	0,660

Tabela 21 - Avaliação comparativa da uniformidade, com (N) e T8.

Salas	Uniformidade Medida - Uo				Uniformidade Simulada - Uo			
	10h	12h	16:30h	Noite	10h	12h	16:30h	Noite
1	0,351	0,312	0,549	0	0,469	0,432	0,460	0
2	0,461	0,552	0,515	0	0,525	0,521	0,514	0
3	0,083	0,180	0,006	0	0,252	0,235	0,252	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,404	0,393	0,346	0	0,442	0,451	0,375	0

Analisadas as Tabelas 20 e 21, concluiu-se:

1. A iluminação artificial, medida à noite, assegura uma boa uniformidade de iluminação, no interior dos gabinetes, conforme valores patentes na Tabela 1;
2. Com o sistema de iluminação natural e artificial em simultâneo, verifica-se que não há uniformidade dos níveis de iluminação. De forma idêntica, verifica-se o mesmo para o sistema de iluminação natural, evidenciando a preponderante influência da luz natural.

4.1.3.3 Encandeamento

Na Tabela 22 apresentam-se os valores mínimos e máximos do encandeamento (UGR) calculados pelo *DIALux*.

Tabela 22 - Valores de encandeamento obtidos no *DIALux*, com T8.

Salas	UGR min	UGR max
1	<10	18
2	<10	17
3	<10	16
4	<10	15
5	<10	14

Os valores estão abaixo dos limites recomendados, conforme Tabela 1.

4.1.3.4 Densidade de potência de iluminação (DPI)

As soluções encontradas a este nível estão patentes na Tabela 23, para as lâmpadas T8.

Tabela 23 - Densidade de potência de iluminação obtida com lâmpadas T8.

Salas	Área (m2)	N. Luminárias	DPI (W/m2)	DPI relativa (W/m2/100 lux)
1	49,8	8	11,15	2,06
2	43,8	8	12,69	2,11
3	42,5	8	13,07	1,99
4	17,3	4	16,05	2,04
5	176,5	32	12,60	1,40

4.2 Projeto a realizar – Hipótese 1 (T5)

As luminárias encastráveis nas versões para fluorescência linear TL5 foram selecionadas tendo em atenção a eficiência não ser inferior a 73%, possuírem as qualificações necessárias para efeito do estudo luminotécnico.

Elegeram-se equipamentos da marca *PHILIPS*, sendo o escolhido, o modelo *TBS460 SQR 4xTL5-14W/840 HFP- C8*, com lâmpadas MASTER-HE-SUPER 80, conforme Figura 33, de dimensões 597x597x59mm (Comprimento x Largura x Altura), com refletor ótico de micro-lamelas tridimensionais de alumínio de alta qualidade com acabamento de alto brilho, rendimento 79,84%, de quatro lâmpadas fluorescentes tubulares, tipo TL5 de 14W, cor 840 *Philips* ou seja com IRC=80 e TC= 4000 K, fluxo luminoso da lâmpada 5000 lm, fluxo luminoso da luminária 3992 lm, potência 63,0W, cuja ficha técnica está no Anexo D.

Determinante na eleição deste modelo foi o binómio preço/rendimento porquanto pareceu desaconselhável do ponto de vista económico a utilização de luminárias do mesmo fabricante, em que a um rendimento de cerca de 90% correspondia um acréscimo de cerca de 100,00€ por luminária.

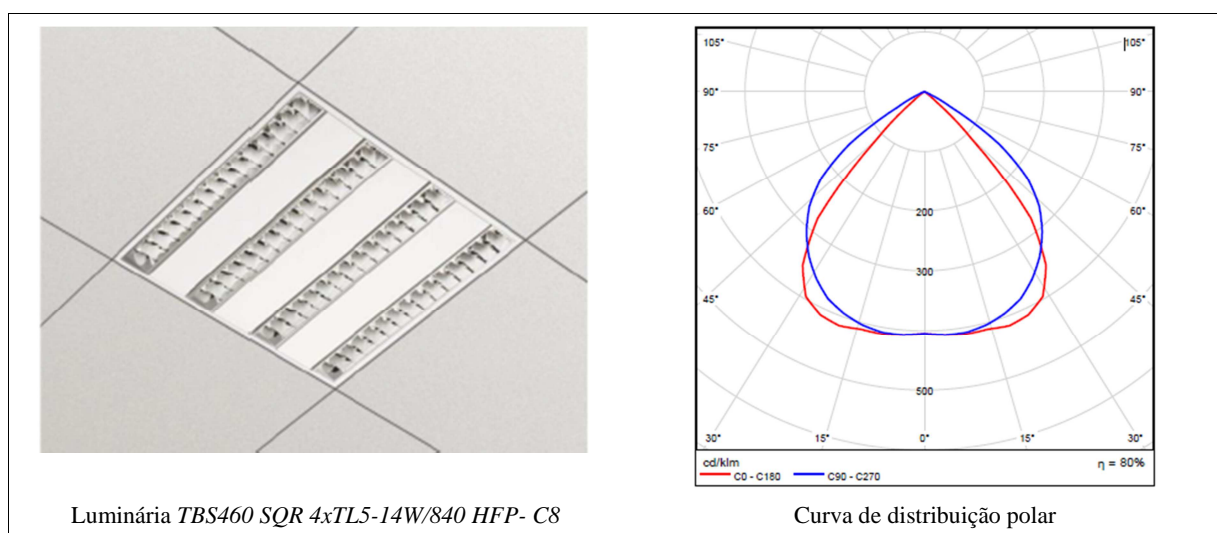


Figura 33 - Luminária para T5 e curva polar (Fonte: *PHILIPS*, 2015).

4.2.1 Simulado no *DIALux*

4.2.1.1 Sala 1

Com o programa *DIALux* foi possível obter a planta da sala e a distribuição das luminárias na mesma, conforme apresentado na Figura 34.

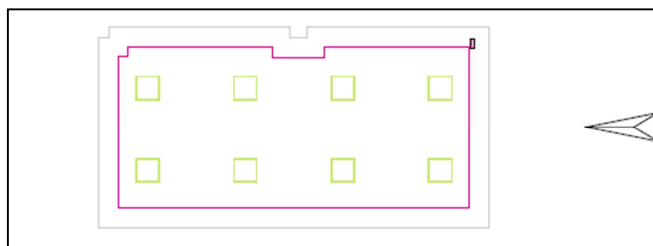


Figura 34 - Distribuição das luminárias com T5 na sala 1.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, nos diferentes horários, são apresentados nos mapas cromáticos, na Figura 35.

Os valores dos níveis de iluminação simulados nos diversos horários, com iluminação artificial e natural em simultâneo apresentam-se na Tabela 24, onde a iluminância média é designada por E_{med} , a iluminância mínima por E_{min} e a iluminância máxima por E_{max} .

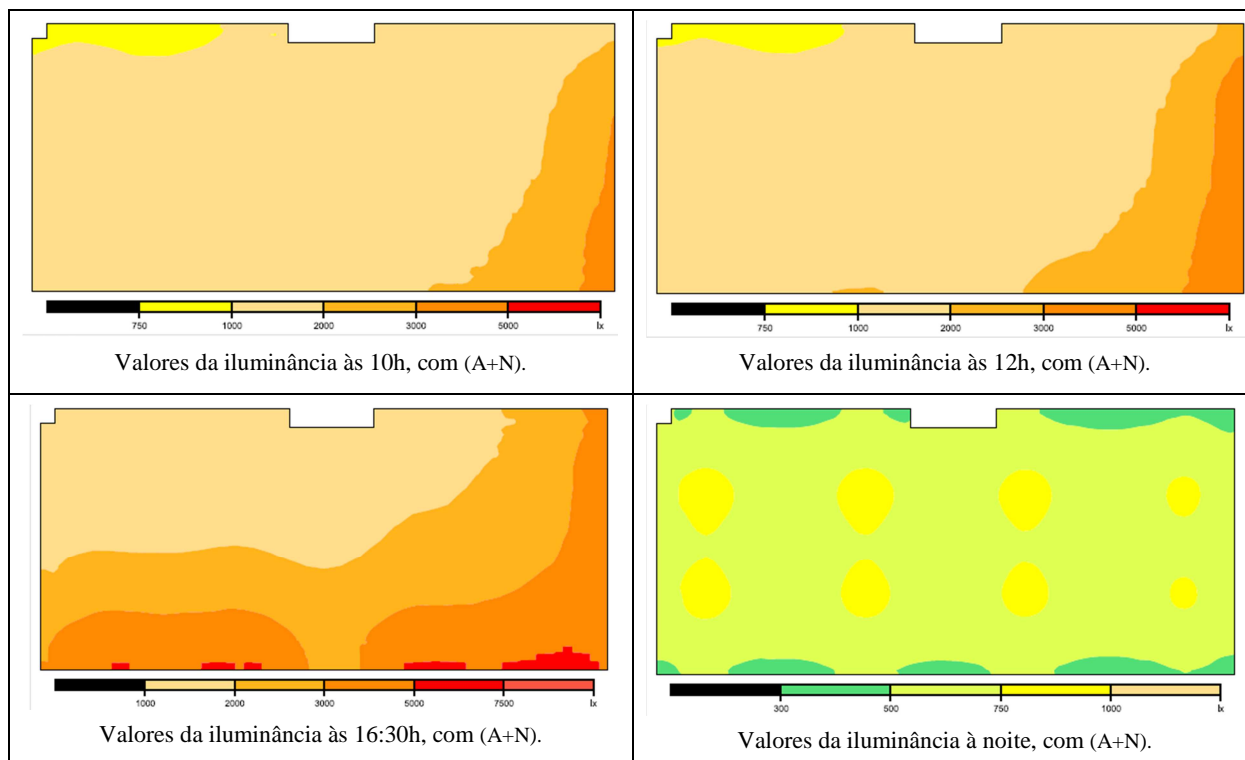


Figura 35 - Mapas cromáticos obtidos, na sala 1 com T5.

Tabela 24 - Valores obtidos no *DIALux* para T5, com A +N na sala 1.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	1553	909	3537	0,585	0,257
12h	1670	923	4220	0,553	0,219
16:30h	2514	1359	5686	0,541	0,239
Noite	658	432	787	0,657	0,549

4.2.1.2 Sala 2

A planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 2, calculadas pelo *DIALux*, é apresentado na Figura 36.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, nos diferentes horários, com **iluminação artificial e natural em simultâneo**, são apresentados nos mapas cromáticos, na Figura 37.

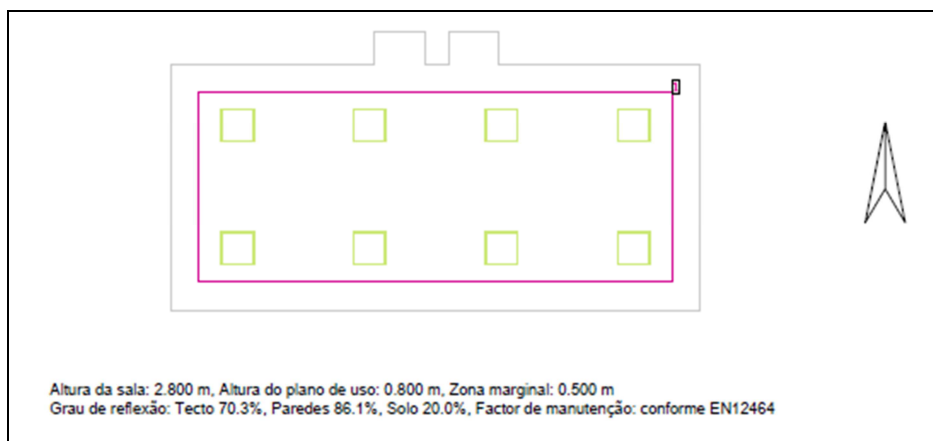


Figura 36 - Distribuição das luminárias com T5 na sala 2.

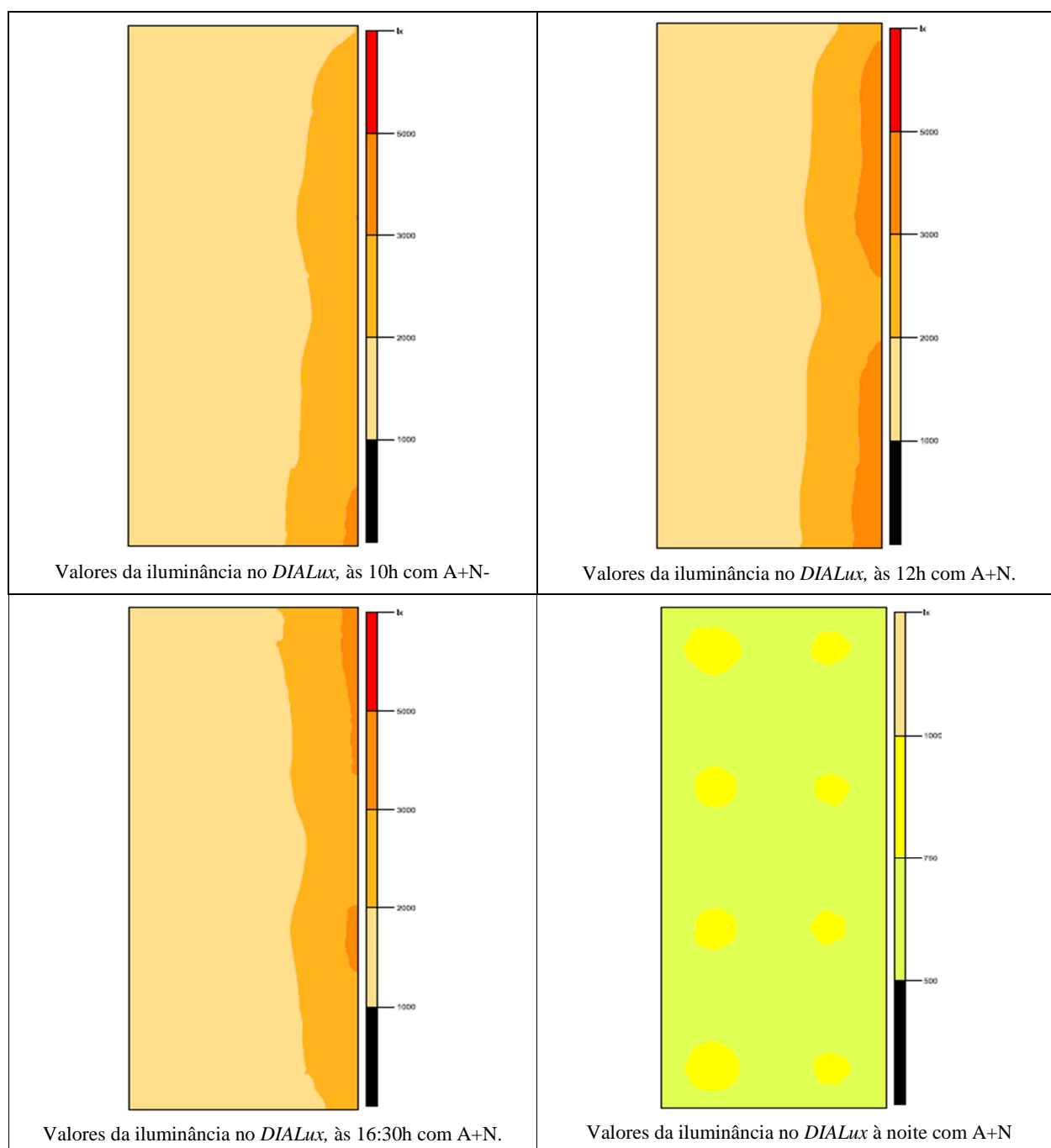


Figura 37 - Mapas cromáticos obtidos, na sala 2 com T5.

Na Tabela 25, apresentam-se os valores dos níveis de iluminação obtidos no *DIALux*.

Tabela 25 - Valores obtidos no *DIALux* para T5, com A +N na sala 2.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	1689	1171	3304	0,693	0,354
12h	1894	1261	3884	0,666	0,325
16:30h	1766	1199	3375	0,679	0,355
Noite	694	572	795	0,824	0,719

4.2.1.3 Sala 3

De forma análoga, apresenta-se na Figura 38 a planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 3, calculadas pelo *DIALux*.

Apresenta-se na Figura 39, os mapas cromáticos dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, com **iluminação artificial e natural em simultâneo**, designada por (A+N).

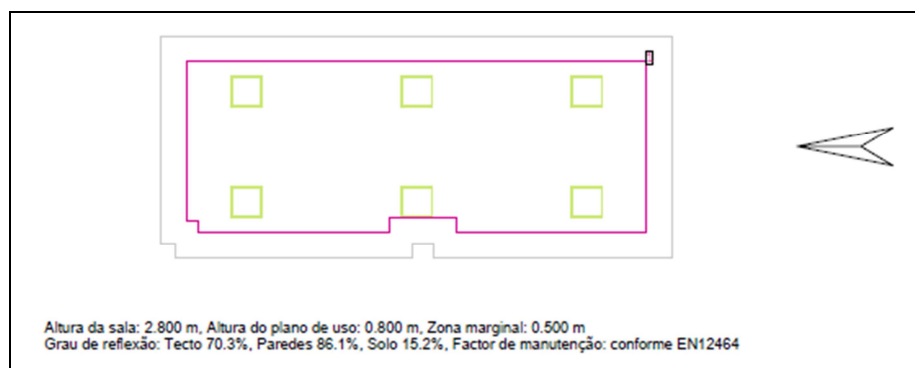


Figura 38 - Planta da posição das luminárias T5 na sala 3.

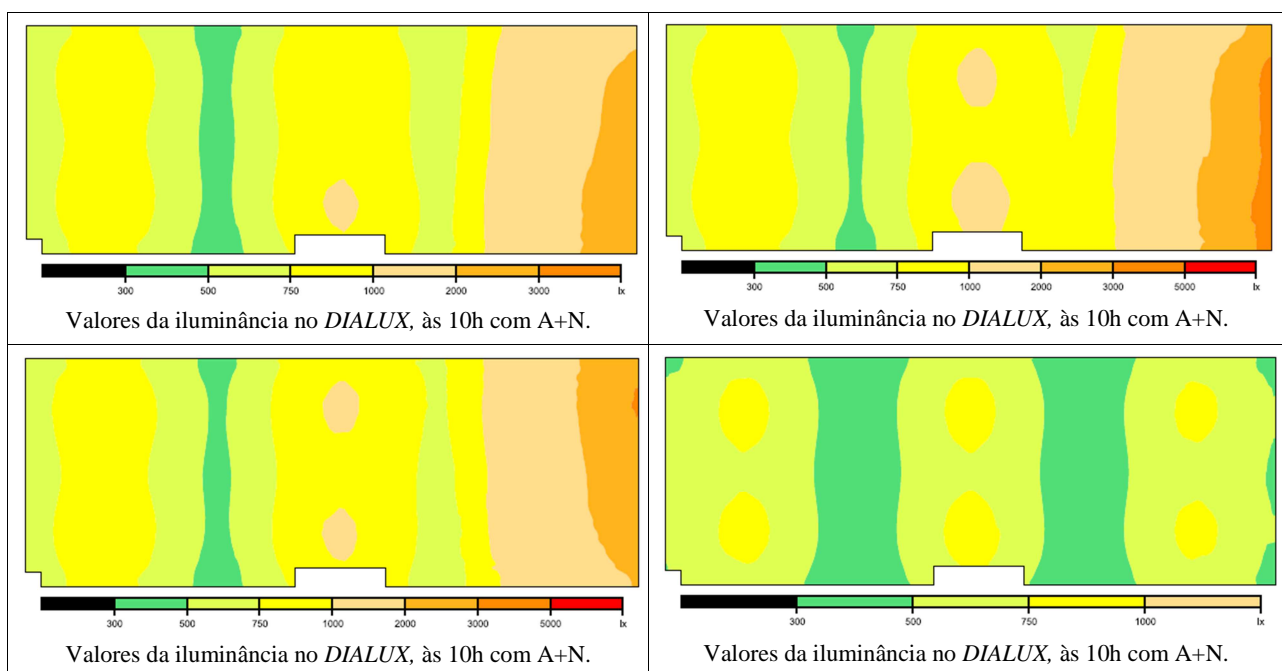


Figura 39 - Mapas cromáticos obtidos, na sala 3 com T5.

Os valores dos níveis de iluminação obtidos no *DIALux*, apresentam-se na Tabela 26, onde a iluminância média é designada por E_{med} , a iluminância mínima por E_{min} e a iluminância máxima por E_{max} .

Tabela 26 - Valores obtidos no *DIALux* para T5, com A +N na sala 3.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	986	427	2854	0,433	0,150
12h	1078	447	3522	0,415	0,127
16:30h	1022	431	3088	0,422	0,140
Noite	583	300	800	0,515	0,375

4.2.1.4 Sala 4

A planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 4, calculadas pelo *DIALux*, conforme apresentado na Figura 40.

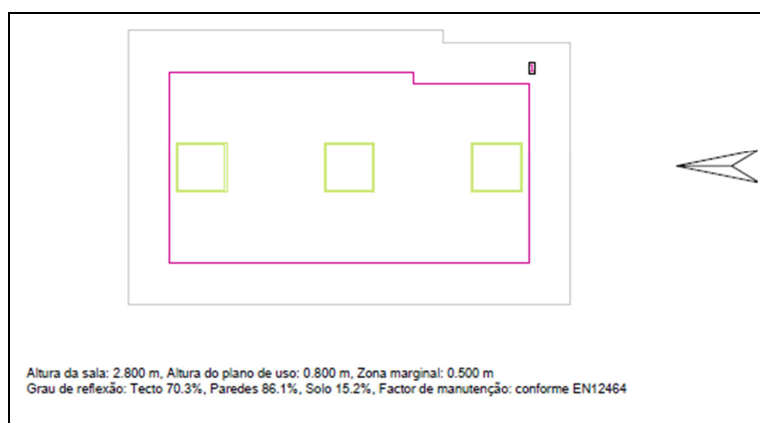


Figura 40 - Distribuição das luminárias com T5 na sala 4

Esta sala está localizada no interior do edifício, não havendo influência de luz natural, com iluminação exclusivamente artificial. Os valores das iluminâncias são iguais nos diferentes horários, razão pela qual, na Figura 41, é apresentado o mapa cromático dos valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, referente a um dos horários.

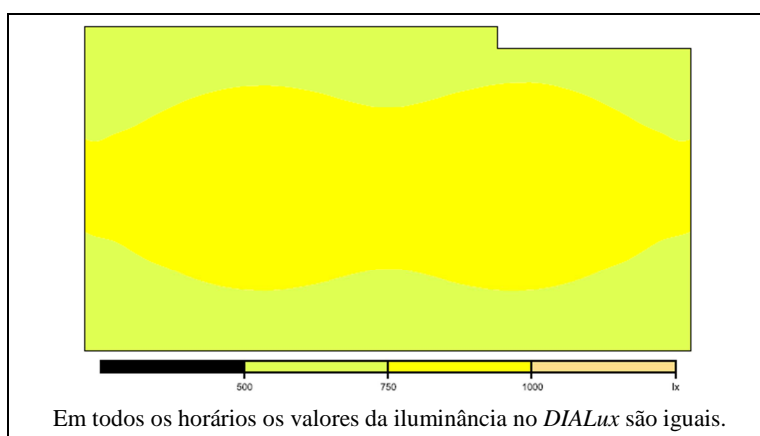


Figura 41 - Mapa cromático obtido na sala 4 com T5.

Apresentam-se na Tabela 27, os valores dos níveis de iluminação obtidos no *DIALux*.

Tabela 27 - Valores obtidos no *DIALux* para T5, com A +N na sala 4.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	759	526	950	0,693	0,554
12h	759	526	950	0,693	0,554
16:30h	759	526	950	0,693	0,554
Noite	759	526	950	0,693	0,554

4.2.1.5 Sala 5

Na Figura 42, apresenta-se a planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 5, calculadas pelo *DIALUX*.

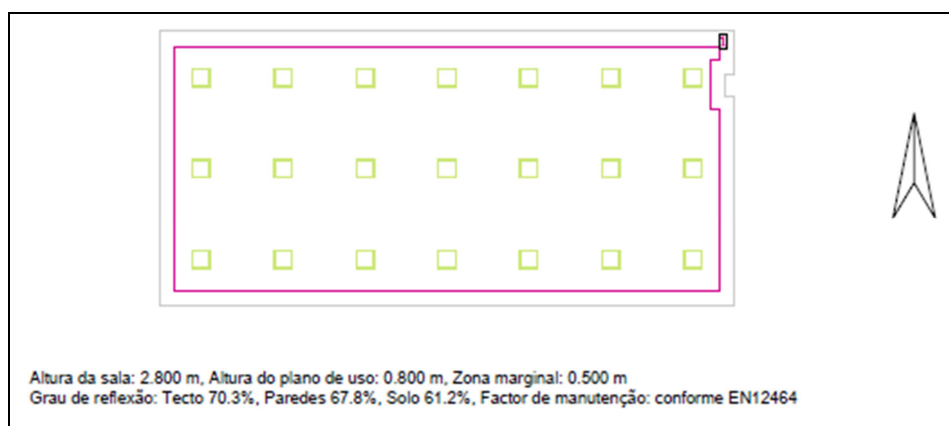


Figura 42 - Distribuição das luminárias T5 na sala 5.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, são apresentados nos mapas cromáticos, na Figura 43, constando os valores, na Tabela 28.

Tabela 28 - Valores obtidos no *DIALux* para T5, com A +N na sala 5.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	1392	890	2943	0,639	0,302
12h	1359	885	2894	0,651	0,306
16:30h	1711	963	5992	0,563	0,161
Noite	691	464	914	0,671	0,508

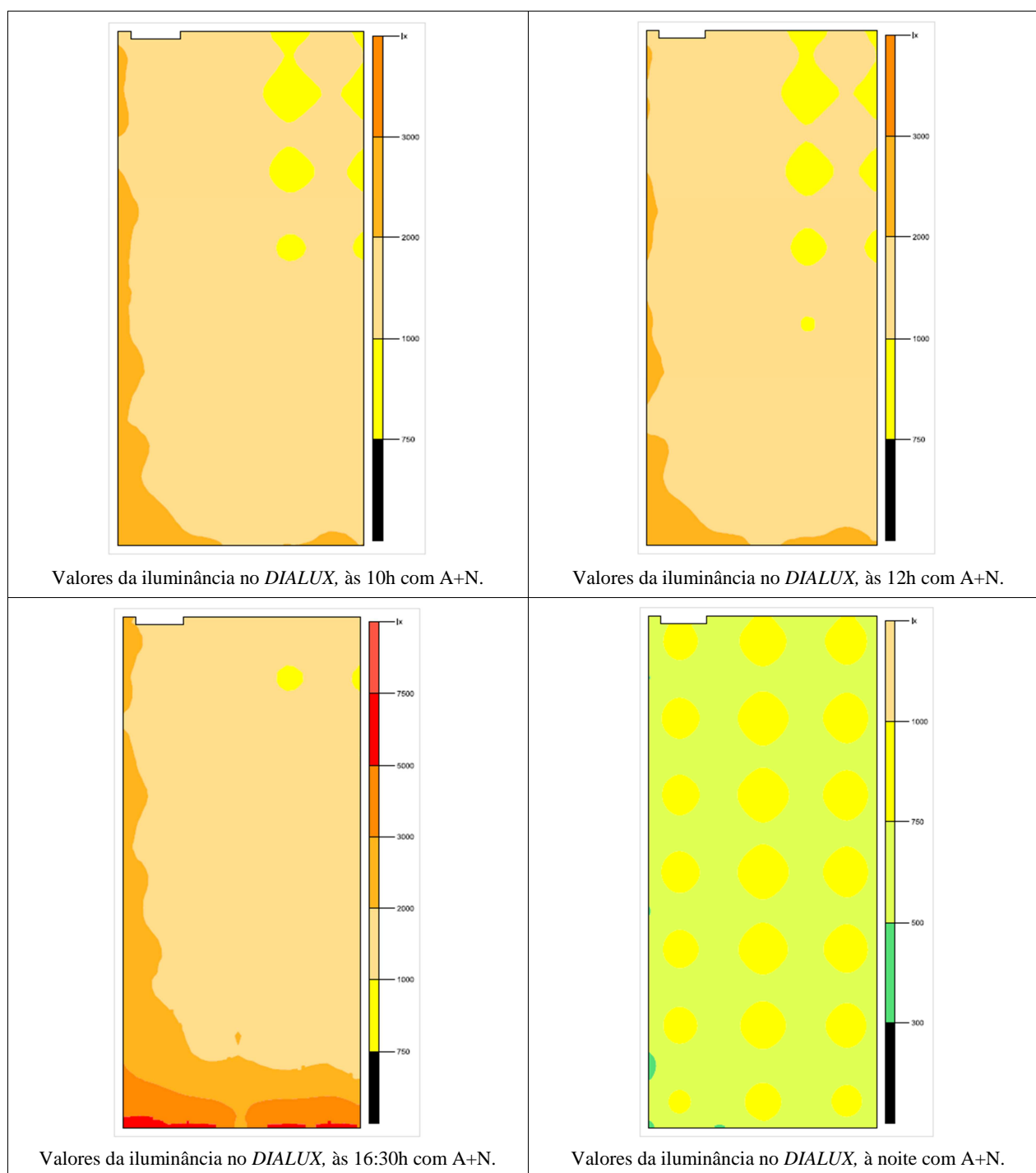


Figura 43 - Mapas cromáticos obtidos na sala 5 com T5.

4.2.2 Avaliação da iluminância e uniformidade

Todos os resultados obtidos, no *DIALux*, poderão ser consultados no Anexo D.

A Tabela 29 apresenta os valores das iluminâncias e a uniformidade calculado/simulado no *DIALux*, nas salas em estudo.

Tabela 29 - Valores obtidos no *DIALux* com T5 nas salas em estudo.

Salas	Iluminância média – E_{med} (lux)				Uniformidade – U_o			
	10h	12h	16:30h	Noite	10h	12h	16:30h	Noite
1	1553	1670	2514	658	0,585	0,553	0,541	0,657
2	1689	1894	1766	694	0,693	0,666	0,679	0,824
3	986	1072	1022	583	0,433	0,415	0,422	0,515
4	759	759	759	759	0,693	0,693	0,693	0,693
5	1392	1359	1711	691	0,639	0,651	0,563	0,671

4.2.3 Encandeamento

Na Tabela 30 apresentam-se os valores mínimos e máximos do encandeamento (UGR) calculados pelo *DIALux*.

Tabela 30 - Valores de encandeamento obtidos no *DIALux*, com T5.

Salas	UGR min	UGR max
1	<10	19
2	<10	19
3	<10	18
4	<10	17
5	<10	17

Os valores encontrados satisfazem o recomendado pela Norma EN 12464-1, conforme Tabela 1.

4.2.4 Densidade de potência de iluminação (DPI)

As soluções encontradas a este nível estão patentes na Tabela 31.

Tabela 31 - Densidade de potência de iluminação obtida com lâmpada T5.

Salas	Área (m ²)	N. Luminárias	DPI (W/m ²)	DPI relativa (W/m ² /100 lux)
1	49,8	8	10,11	1,54
2	43,8	8	11,51	1,66
3	42,5	6	8,89	0,82
4	17,3	3	10,91	1,44
5	176,5	21	7,50	1,09

4.3 Projeto a realizar – Hipótese 2 (LED)

Optou-se por considerar a utilização de luminárias de tecnologia *LED* da marca *PHILIPS*, modelo *RC461B G2 W60L60 1xLED40S/840 PSD*, ou seja com IRC=80 e TC= 4000 K, retratadas na Figura 44.

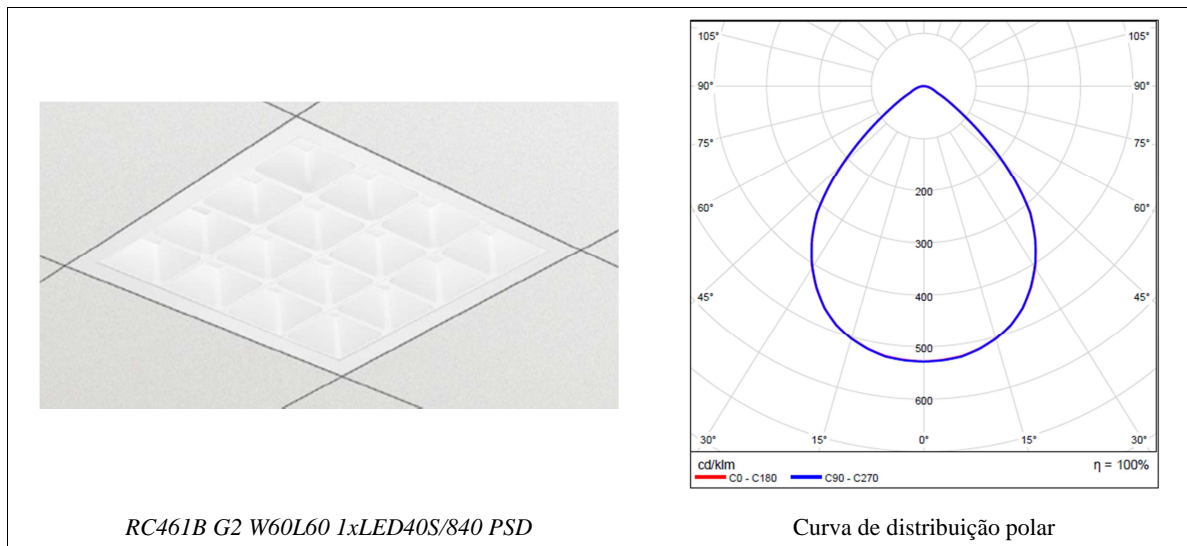


Figura 44 - Luminária *LED* e diagrama de intensidade polar (Fonte: *PHILIPS*, 2015).

4.3.1 Simulado no *DIALUX*

4.3.1.1 Sala 1

A Figura 45 mostra a planta da sala e a distribuição das luminárias na mesma.

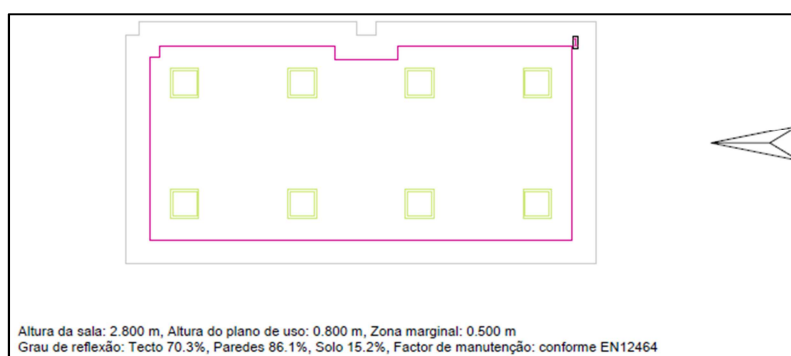


Figura 45 - Distribuição das luminárias *LED* na sala 1.

Com o auxílio do *DIALux*, foram calculados os níveis de iluminância nos quatro cenários correspondentes aos quatro horários definidos como representativos das distintas situações, conforme se pode visualizar na Figura 46.

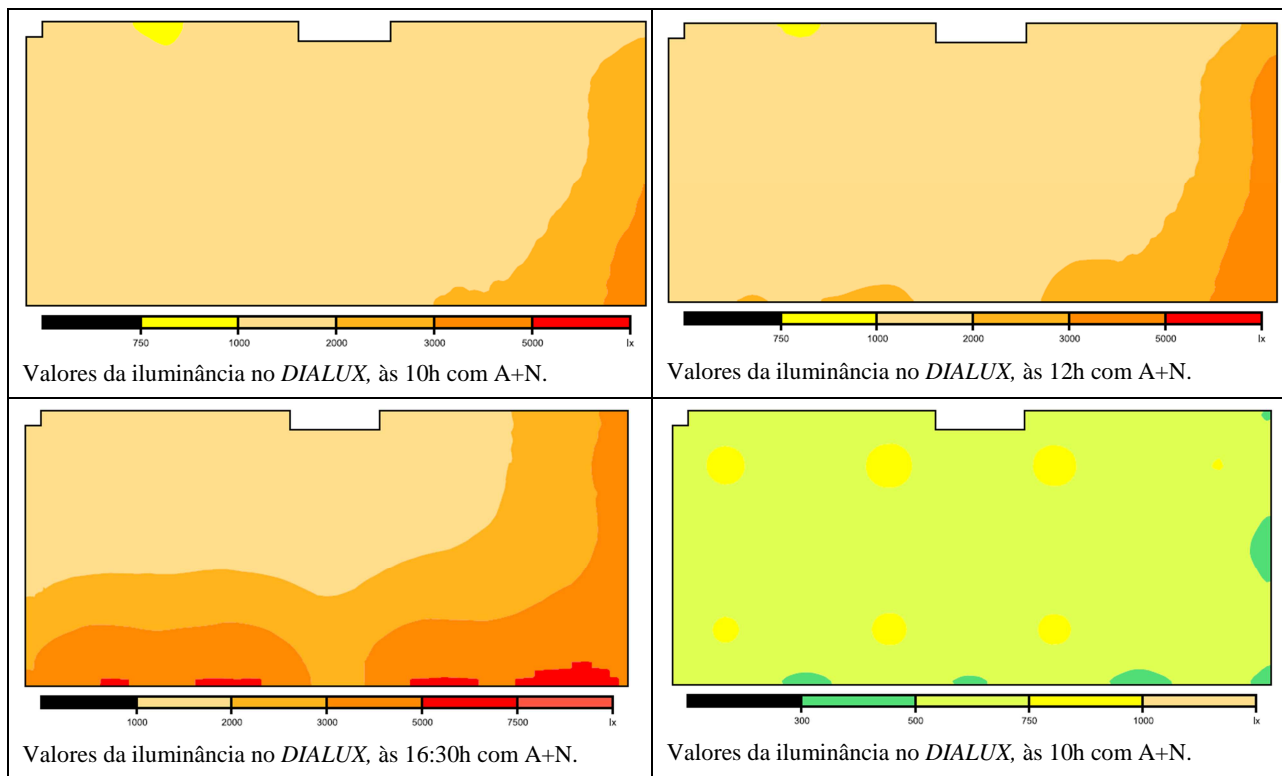


Figura 46 - Mapas cromáticos obtidos na sala 1 com LED.

Os valores calculados por este programa, nos diversos horários, apresentam-se na Tabela 32.

Tabela 32 - Valores obtidos no *DIALux* para LED, com A +N na sala 1.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	1515	971	3530	0,641	0,275
12h	1631	981	4187	0,601	0,234
16:30h	2477	1430	5724	0,577	0,250
Noite	619	444	787	0,717	0,564

4.3.1.2 Sala 2

A planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 2, calculadas pelo *DIALux*, é apresentado na Figura 47.

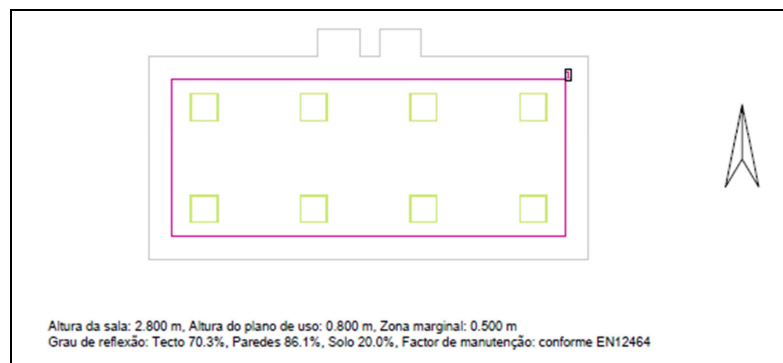


Figura 47 - Distribuição das luminárias LED na sala 2.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Valores obtidos no *DIALux* para LED, com A +N na sala 2.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	1682	1142	3296	0,679	0,347
12h	1888	1230	3875	0,651	0,317
16:30h	1760	1173	3384	0,666	0,347
Noite	688	542	806	0,788	0,672

Os mapas cromáticos correspondentes são apresentados na Figura 48.

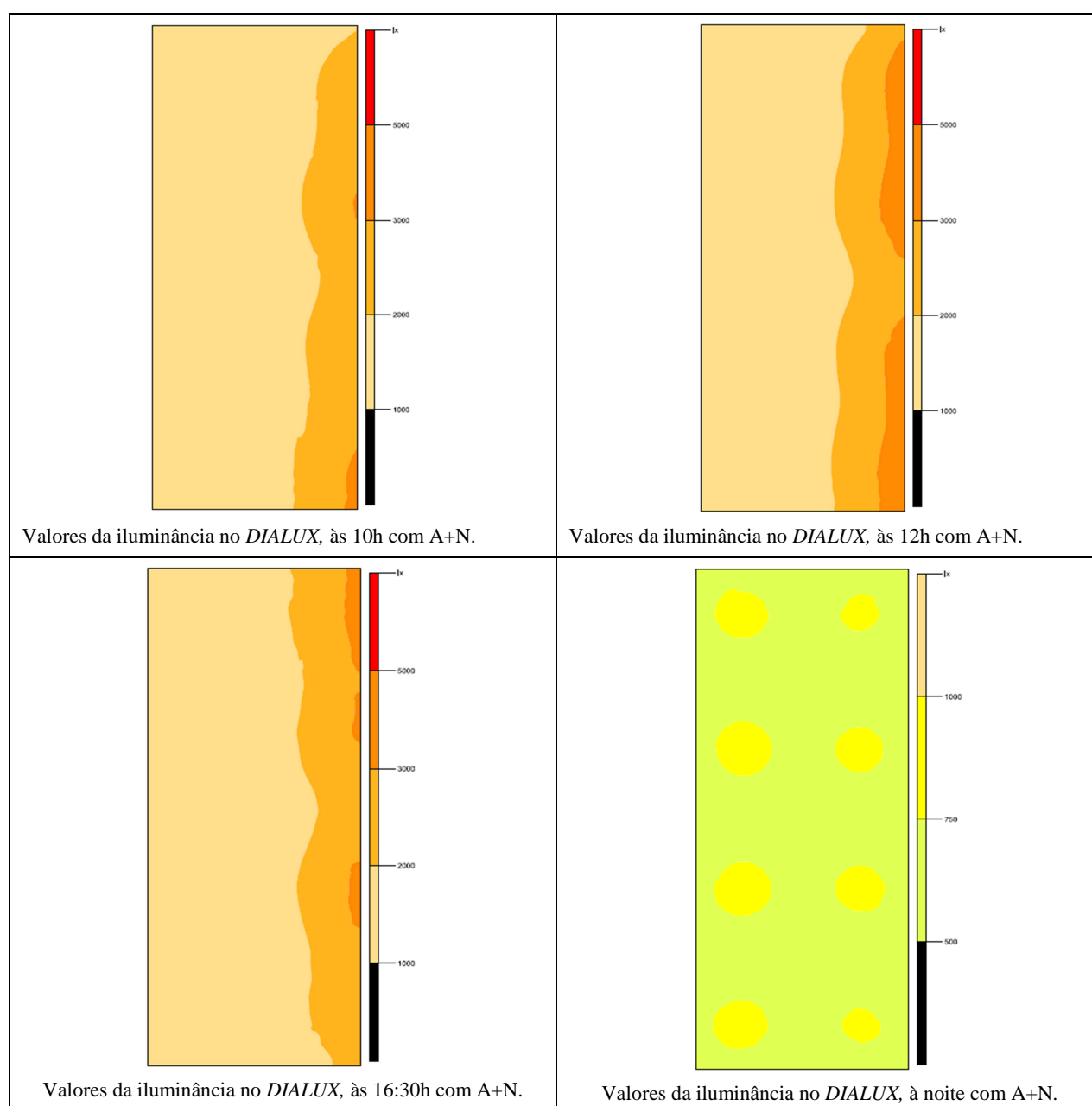


Figura 48 - Mapas cromáticos obtidos na sala 2 com *LED*.

4.3.1.3 Sala 3

De forma análoga, apresenta-se na Figura 49 a planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 3, calculadas pelo *DIALux*.

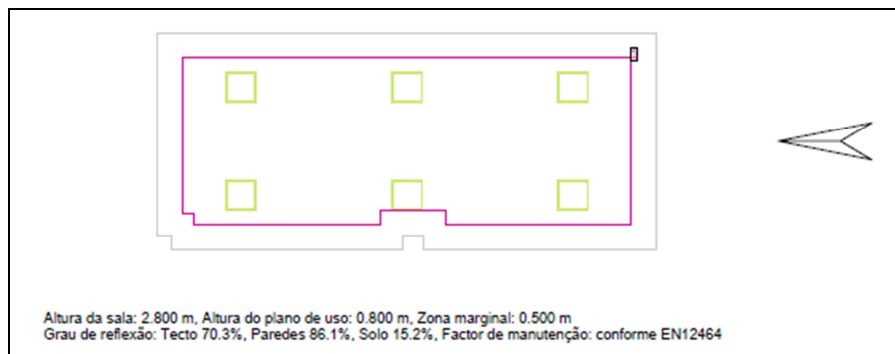


Figura 49 - Distribuição das luminárias com *LED* na sala 3.

Os respetivos valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, são apresentados nos mapas cromáticos, na Figura 50.

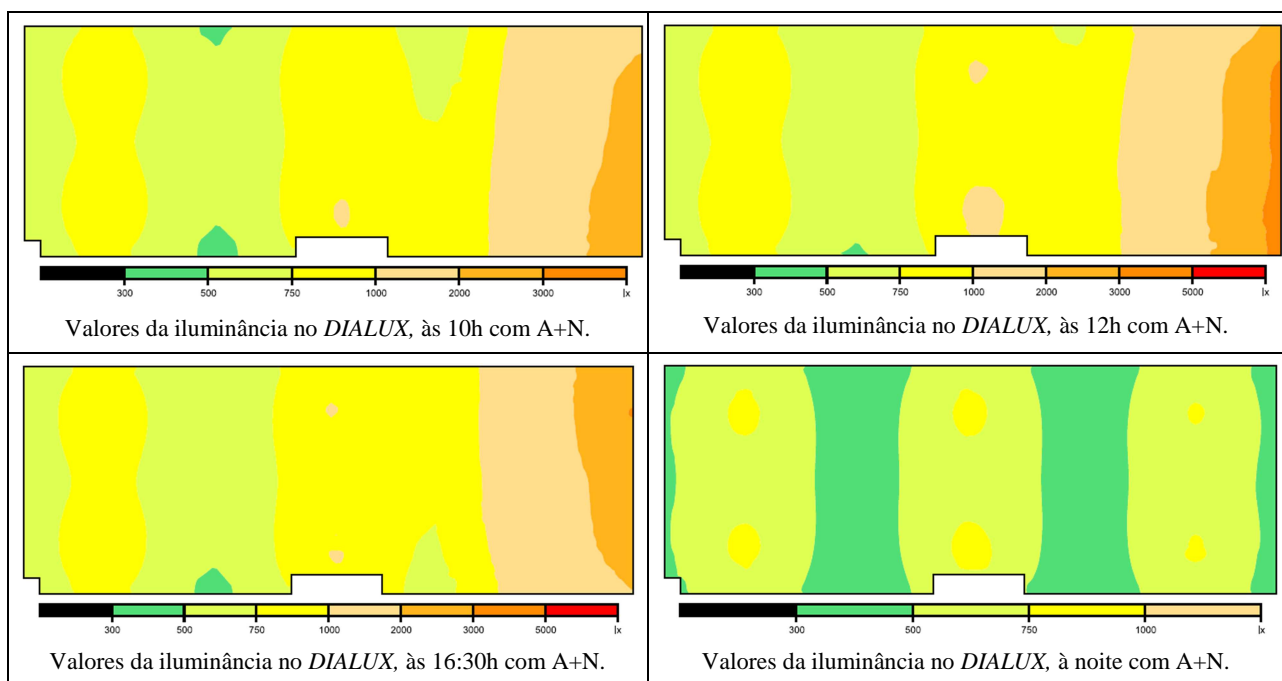


Figura 50 - Mapas cromáticos obtidos na sala 3 com *LED*.

Os valores dos níveis de iluminação obtidos no *DIALux*, apresentam-se na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores obtidos no *DIALux* para *LED*, com A +N na sala 3.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	972	472	2823	0,486	0,167
12h	1065	492	3468	0,462	0,142
16:30h	1008	475	3039	0,471	0,156
Noite	569	349	788	0,613	0,443

4.3.1.4 Sala 4

Apresenta-se na Figura 51, a planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 4, calculadas pelo *DIALux*.

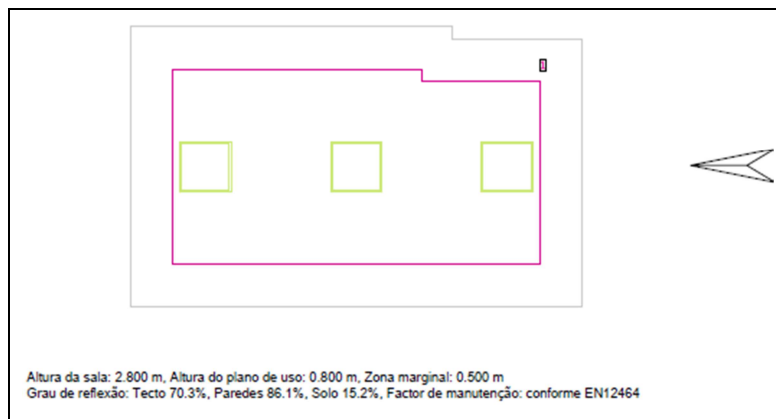


Figura 51 - Distribuição das luminárias com *LED* na sala 4

Sala localizada no interior do edifício, com apenas luz artificial. Os valores das iluminâncias são iguais nos diferentes horários. Assim, será apresentado na Figura 52, o mapa de cores dos valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux*, num dos horários.

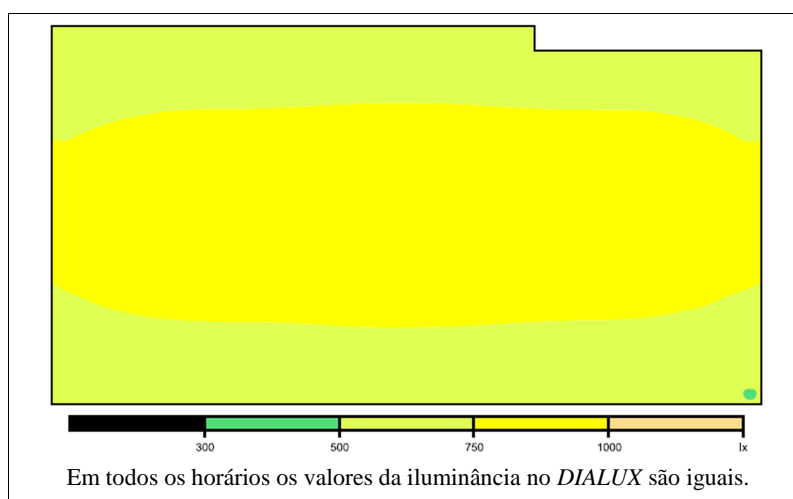


Figura 52 - Mapa cromático obtido na sala 4 com *LED*.

Os valores dos níveis de iluminação obtidos no *DIALux*, apresentam-se na Tabela 35.

Tabela 35 - Valores obtidos no *DIALux* para LED, com A +N na sala 4.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	755	497	935	0,658	0,532
12h	755	497	935	0,658	0,532
16:30h	755	497	935	0,658	0,532
Noite	755	497	935	0,658	0,532

4.3.1.5 Sala 5

A planta da sala e a distribuição das luminárias na sala 5, calculadas pelo *DIALux*, apresenta-se na Figura 53.

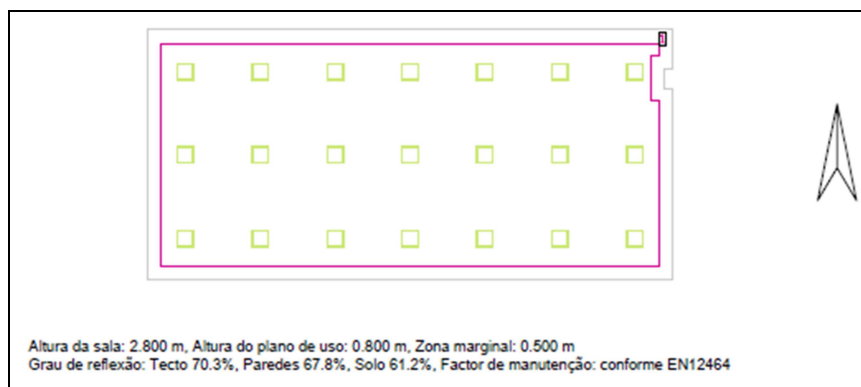


Figura 53 - Distribuição das luminárias com *LED* na sala 5.

Os valores dos níveis de iluminação no plano de trabalho, obtidos no *DIALux* nos diferentes horários, são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Valores obtidos no *DIALux* para *LED*, com A +N na sala 5.

Horário	E_{med} (lux)	E_{min} (lux)	E_{max} (lux)	E_{min}/E_{med} (lux)	E_{min}/E_{max} (lux)
10h	1386	872	2906	0,629	0,300
12h	1354	863	2848	0,637	0,303
16:30h	1705	960	5946	0,563	0,161
Noite	685	426	960	0,622	0,444

Os mapas cromáticos correspondentes apresentam-se na Figura 54.

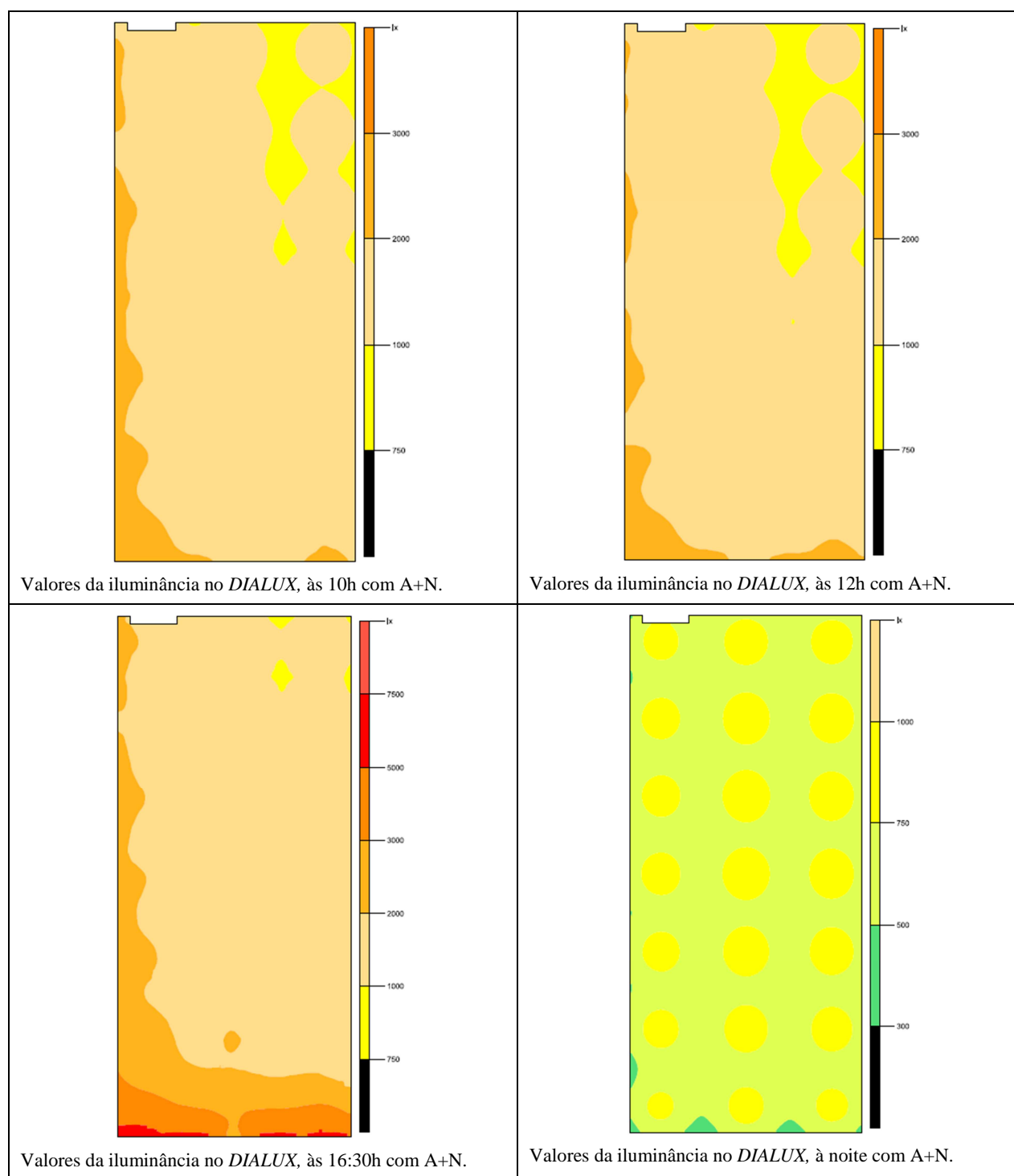


Figura 54 - Mapas cromáticos obtidos na sala 5 com LED.

4.3.2 Avaliação da iluminância e uniformidade

Todos os resultados obtidos no *DIALux* poderão ser consultados no Anexo D.

A Tabela 37 apresenta os valores das iluminâncias e uniformidades calculadas/simuladas no *DIALux*, nas salas em estudo.

Tabela 37 - Valores obtidos no *DIALux* com *LED* nas salas em estudo.

Salas	Iluminância média – E_{med} (lux)				Uniformidade – U_o			
	10h	12h	16:30h	Noite	10h	12h	16:30h	Noite
1	1515	1631	2477	619	0,641	0,601	0,577	0,717
2	1682	1888	1760	688	0,679	0,651	0,666	0,788
3	972	1065	1008	569	0,486	0,462	0,471	0,613
4	755	755	755	755	0,658	0,658	0,658	0,658
5	1386	1354	1705	685	0,629	0,637	0,563	0,622

Também aqui, os valores encontrados são elevados face ao normativo aplicável, conforme a Tabela 1, moderadamente os relativos à iluminação artificial e substancialmente, como seria expectável devido à influência da luz solar, os respeitantes à iluminação natural.

4.3.3 Encandeamento

Na Tabela 38, apresentam-se os valores mínimos e máximos do encandeamento (UGR) calculados naquela aplicação.

Tabela 38 - Valores de encandeamento obtidos no *DIALux*, com *LED*.

Salas	UGR min	UGR max
1	<10	18
2	<10	18
3	<10	18
4	<10	17
5	<10	15

O normativo aplicável é satisfeito, conforme Tabela 1.

4.3.4 Densidade de potência de iluminação (DPI)

As soluções encontradas a este nível estão patentes na Tabela 39, para as lâmpadas *LED*.

Tabela 39 - Densidade de potência de iluminação obtida com lâmpadas LED.

Salas	Área (m2)	N. Luminárias	DPI (W/m2)	DPI relativa (W/m2/100 lux)
1	49,8	8	5,22	0,84
2	43,8	8	5,94	0,86
3	42,5	6	4,59	0,81
4	17,3	3	5,63	0,75
5	176,5	21	3,87	0,56

4.4 Análise comparativa das soluções luminotécnicas

4.4.1 Iluminância e Uniformidade

Visando a análise comparativa do existente e das duas soluções preconizadas, para o caso simulado pelo *DIALux* com **iluminação artificial e natural em simultâneo (A+N)**, apresentam-se na Figura 55 os valores da iluminância média das 3 tecnologias em estudo, com base nas Tabelas 18, 29 e 37 e os valores normativos aplicáveis (assinalado no mapa com uma linha vermelha).

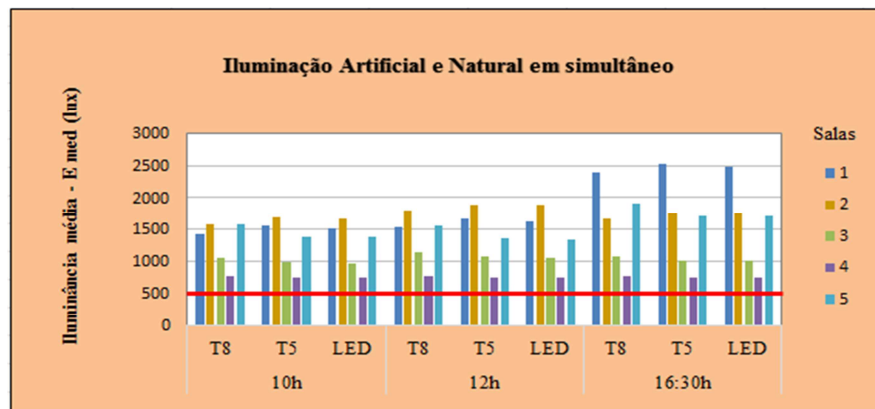


Figura 55 - Avaliação comparativa das iluminâncias nas três tecnologias, com A+N.

Para o mesmo fim e de forma análoga, apresentam-se na Figura 56 os valores da uniformidade das três tecnologias nas salas em estudo e os normativos aplicáveis, com base nos valores das Tabelas 20, 29 e 37.

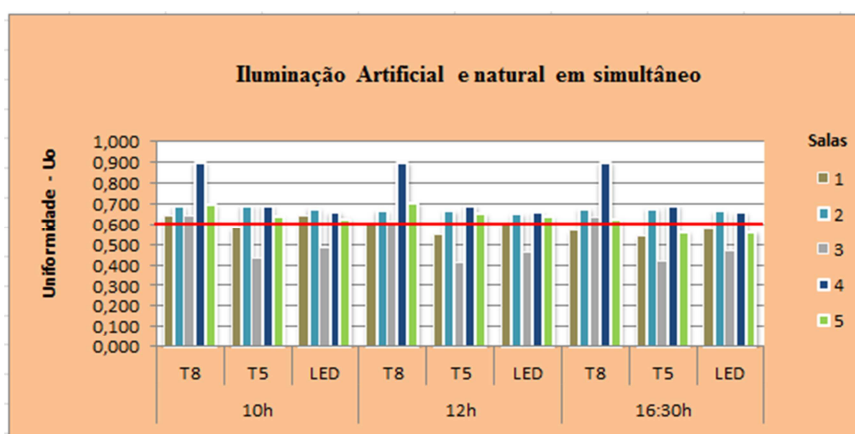


Figura 56 - Avaliação comparativa das uniformidades nas três tecnologias, com A+N.

Visando análise comparativa e com base nas Tabelas 18, 20, 29 e 37, apresentam-se nas Figuras 57 e 58, os valores da iluminância média e da uniformidade obtidos no *DIALux* com **iluminação artificial**, das três soluções aqui tratadas, bem como as disposições normativas aplicáveis.

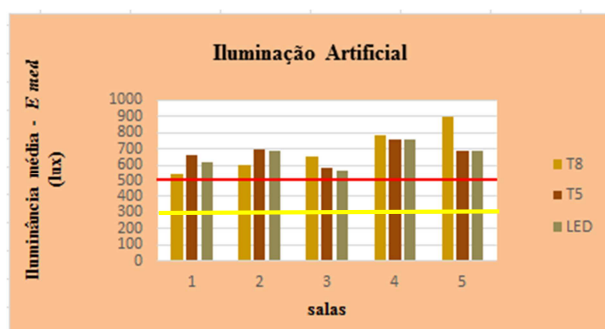


Figura 57 - Avaliação comparativa das iluminâncias, com iluminação (A).

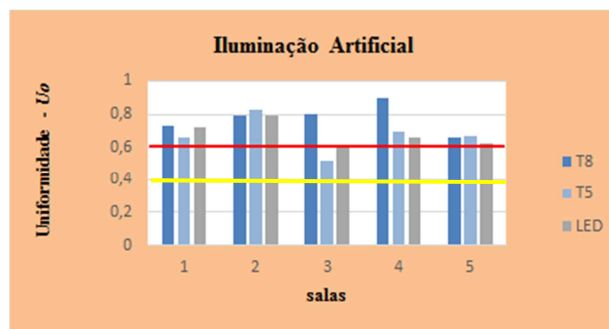


Figura 58 - Avaliação comparativa das uniformidades, com iluminação (A).

Tal como o verificado para o sistema de iluminação baseado nas lâmpadas fluorescentes T8, nas duas soluções projetadas (T5 e LED) verifica-se que, com os dois sistemas de iluminação natural e artificial em simultâneo (A+N), os resultados obtidos revelam níveis de iluminação elevados, tendo em conta o valor recomendado na norma EN 12464-1(2002), conforme Tabela 1. Tal facto, é fruto da influência da luz natural, que supre genericamente, as necessidades visuais para as atividades desenvolvidas nos locais e os cálculos não levaram em consideração a presença de estores.

Todavia, os valores médios de iluminância, da iluminação exclusivamente artificial calculada à noite para os tipos de lâmpadas aqui em avaliação, atende ao cumprimento das especificações dos valores recomendados pela norma EN 12464-1, conforme tabela 1.

Na sala 3, a uniformidade para a T5 está abaixo de 0,6, no entanto a norma EN 12464-1 (2002) prevê a consideração explícita da existência de áreas circundantes à área da tarefa, com iluminância mínima de 300 lux e uniformidade 0,4.

O aumento do nº de luminárias, para uma matriz de 4x2, conduziria a níveis médios de iluminação de aproximadamente de 1000 lux e uniformidades de 0,7. O elevado valor de iluminância assim obtido, o sobrecusto de investimento e de exploração daí decorrentes por um lado e a possibilidade prevista na norma EN 12464-1 (2002), determinaram a opção pela solução inicial de uma matriz de 3x2 luminárias.

4.4.2 Densidade potência de iluminação relativa

Para além da iluminância e uniformidade, avaliados nos itens anteriores, outras características importantes na definição da solução luminotécnica são indubitavelmente a densidade de potência de iluminação (DPI) e a densidade de potência de iluminação relativa (DPI relativa).

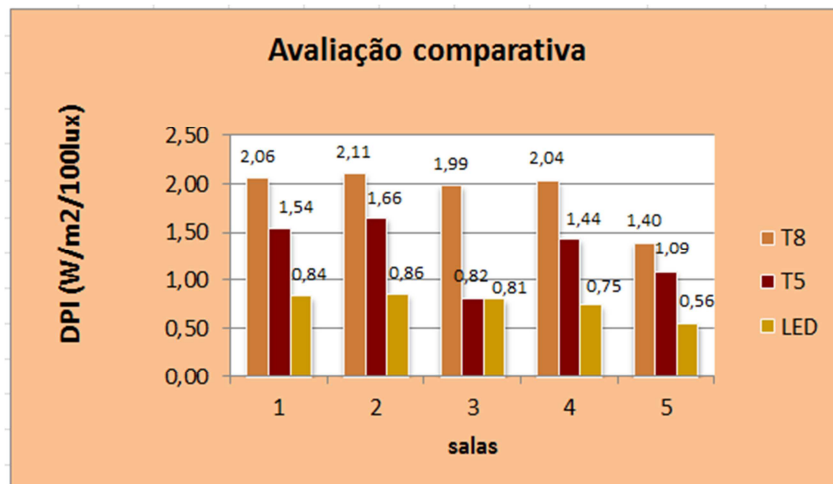


Figura 59 - Avaliação comparativa das densidades de potência das soluções em estudo.

Nas soluções em estudo, conforme se pode visualizar na Figura 59, não foram ultrapassados os valores máximos de DPI relativa, que de acordo com a norma EN15193 são 2,5 (W/m²/100lux) para escritórios com mais de 6 pessoas e 2,8 (W/m²)/100lux para escritório individual 1-6 pessoas.

Os piores resultados são obtidos com as lâmpadas T8 e os melhores são conseguidos com lâmpadas LEDs.

4.4.3 Encandeamento

Visando comparar as Tabelas 22, 30 e 38, apresenta-se na Figura 60, os valores obtidos no *DIALUX* referente ao encandeamento das tecnologias em estudo.

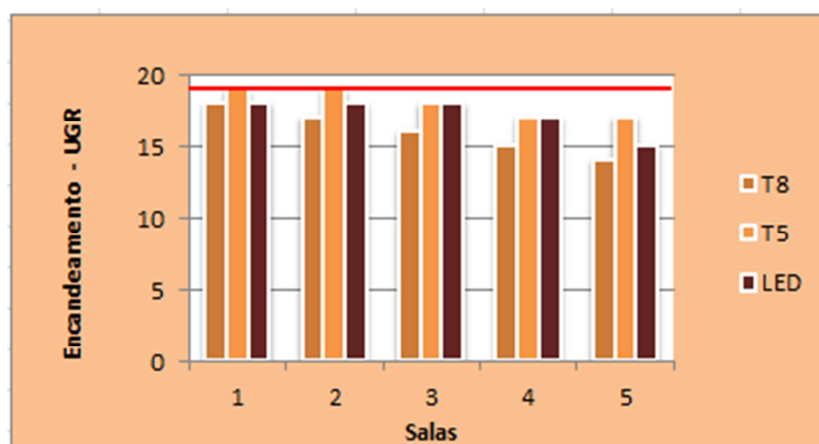


Figura 60 - Avaliação comparativa do encandeamento das 3 soluções e Norma.

Conforme se pode visualizar na Figura 60, não foram ultrapassados os valores máximos de UGR max, que de acordo com a norma EN12464-1 são 19.

PARTE 3 – ANÁLISE TÉCNICO-FINANCEIRA

5 ANÁLISE TÉCNICO-FINANCEIRA

Como nota explicativa para a decisão tomada de não contemplar a solução *Retrofit* neste estudo, no entanto, achou-se por bem anexar a título meramente informativo o *PAYBACK* calculado para essa solução.

5.1 Consumo Energético

Tendo em conta a alteração das luminárias e o consumo das mesmas, obtém-se a Tabela 40 de consumos, onde de forma detalhada se apresentam a quantidade de luminárias e a potência elétrica consumida pelas mesmas. A potência elétrica por luminária inclui a potência consumida pelo conjunto lâmpada e acessórios.

Para o cálculo do consumo energético anual, estimou-se o número de horas de funcionamento médio diário de 8h, com base em 264 dias de trabalho por ano (12 meses x 22dias), que corresponde anualmente a 2112h de utilização. Os valores calculados para esse parâmetro, resultam da utilização das equações 4 e 5.

$$PTC = NA \times PL$$

Equação 4 - Potência total consumida

$$CA = \frac{PTC \times UA}{1000}$$

Equação 5 - Consumo energético Anual

em que:

PTC	- Potência Total Consumida (W)	PL	- Potência / Luminária (W)
NA	- N° de Luminárias (un)	UA	- Utilização Anual (h/ano)
CA	- Consumo energético Anual (KWh)		

O resultado obtido evidencia o desinteresse económico em optar por *Retrofit*, porquanto a solução para satisfazer as necessidades normativas de iluminação passaria pelo aumento do n° de luminárias. Dado que as luminárias existentes são descontinuadas no mercado, resultaria daí a necessidade de aquisição da totalidade das mesmas.

Tabela 40 - Consumo energético anual das luminárias.

Equipamento	N° Luminárias (un)	Potência / luminária (W)	Potência total consumida (W)	Utilização anual (h/ano)	Consumo energético anual (KWh)
T8	60	70,1	4.206,0	2112	8.883,072
T5	46	62,3	2.865,8	2112	6.052,570
LED	46	56,0	2.576,0	2112	5.440,512
Retrofit LED\	76	40,0	3.040,0	2112	6.420,480

5.2 Custos

Na Tabela 41 apresentam-se os valores calculados dos **custos de exploração anual** que traduzem o custo de energia ao longo dos anos de cada solução considerando a inflação de taxa fixa de 3% e o preço da energia atual de 0,15 €/kWh limitada a um ciclo de vida útil da solução com maior duração, que são 23 para os LEDs.

O cálculo dos custos de exploração anual para cada solução resulta da utilização da Equação 6.

$$CEA = \sum_{nper=1}^n CA \times CE \times (1 + TI)^{nper}$$

Equação 6 - Custo de Exploração Anual

em que:

CEA - Custo de Exploração Anual (€/ano)

CA - Consumo energético Anual (KWh)

CE - Custo de Energia (€/KWh)

TI - Taxa de inflação

nper - Número de períodos

Tabela 41 - Custo de exploração anual.

Anos	Custo anual de energia com inflação			
	T8	T5	Retrofit	LED
1	1.372,43	935,12	991,96	840,56
2	1.413,61	963,18	1.021,72	865,78
3	1.456,02	992,07	1.052,37	891,75
4	1.499,70	1.021,83	1.083,95	918,50
5	1.544,69	1.052,49	1.116,46	946,06
6	1.591,03	1.084,06	1.149,96	974,44
7	1.638,76	1.116,58	1.184,46	1.003,67
8	1.687,92	1.150,08	1.219,99	1.033,78
9	1.738,56	1.184,58	1.256,59	1.064,80
10	1.790,72	1.220,12	1.294,29	1.096,74
11	1.844,44	1.256,73	1.333,12	1.129,64
12	1.899,77	1.294,43	1.373,11	1.163,53
13	1.956,76	1.333,26	1.414,30	1.198,44
14	2.015,47	1.373,26	1.456,73	1.234,39
15	2.075,93	1.414,46	1.500,43	1.271,42
16	2.138,21	1.456,89	1.545,45	1.309,56
17	2.202,35	1.500,60	1.591,81	1.348,85
18	2.268,43	1.545,61	1.639,57	1.389,32
19	2.336,48	1.591,98	1.688,75	1.431,00
20	2.406,57	1.639,74	1.739,42	1.473,93
21	2.478,77	1.688,93	1.791,60	1.518,14
22	2.553,13	1.739,60	1.845,35	1.563,69
23	2.629,73	1.791,79	1.900,71	1.610,60
24	2.708,62	1.845,54	1.957,73	1.658,92
Total:	47.248,08	32.192,95	34.149,82	28.937,48

Na Tabela 42 apresentam-se os valores calculados dos **custos de manutenção anual**.

No custo de manutenção, considera-se o custo correspondente ao período de utilização, tendo por base os seguintes tempos de vida útil de 12.000h nas lâmpadas fluorescentes T8, de 24.000h nas lâmpadas fluorescentes T5, nas lâmpadas *retrofit LED* 40.000h, balastros ou *drivers* 100.000h e módulos LED 50.000h. No caso particular dos LEDs, a reparação dos mesmos, acarreta a substituição da luminária completa.

O cálculo do custo de manutenção anual deriva da aplicação da Equação 7.

$$CMA = \left((CL \times NA \times NL) \times \left(\frac{UA}{VUL} \right) \right) + (CB \times NB \times NA) \times \left(\frac{UA}{VUB} \right)$$

Equação 7 - Custo de Manutenção Anual

em que:

- CMA - Custo Manutenção Anual (€/ano)
- CL - Custo de cada Lâmpada (€)
- NA - N° de Luminárias (un)
- NL - N° de lâmpadas ou módulo/Luminária (un)
- UA - Utilização Anual (h/ano)
- VUL - Vida Útil da Lâmpada (h)
- CB - Custo do balastro ou *Driver* (€)
- NB - N° de Balastros ou *Driver*/Luminária (un)
- VUB - Vida Útil do Balastro ou módulo (h)

Tabela 42 - Custo de manutenção anual.

Equipamento	N° Luminárias (un)	N° Lâmpadas ou módulos (un)	Custo da lâmpada (€)	N° balastros /luminária (un)	Custo do balastro (€)	Custo de manutenção (€/ano) ¹
T8	60	4	4,25	2	13,3	213,23
T5	46	4	7,27	1	18,0	135,20
LED	46	1	401,05	0	0,0	779,26
Retrofit LED	76	4	42,00	0	0,0	674,15

Na Tabela 43 apresentam-se os valores calculados dos **custos de investimento**, tendo-se para o efeito utilizado a Equação 8.

$$CI = NA \times CL$$

Equação 8 - Custo de Investimento

em que:

¹ Só há custos de manutenção a partir do 5º ano nas soluções fluorescentes T8, a partir do 10º ano para as fluorescentes T5, a partir do 18º ano para *Retrofit* e a partir de 23º ano para *LED*.

- CI - Custo de Investimento (€)
- CL - Custo de cada Lâmpada (€)
- NA - N° de Luminárias (un)

O custo de investimento é o somatório dos custos de aquisição de todos os equipamentos que compõem o sistema de iluminação, tais como lâmpadas, luminárias, transformadores, reatores, ignitores e a cablagem, acrescidos dos custos de mão-de-obra dos profissionais envolvidos, desde a elaboração do projeto à instalação final.

No relativo ao custo das luminárias, neste trabalho foi considerado o valor patente nas Tabelas de venda ao público (Philips, 2015), no pressuposto que os descontos comerciais vulgarmente praticados pelos fabricantes/revendedores, suprem os valores relativos à mão-de-obra da instalação das mesmas.

Tabela 43 - Custo de Investimento das luminárias.

Equipamento	N. Luminárias (un)	Custo de luminária (€/un)	Custo de Investimento (€)
T5	46	263,16	12.105,36
LED	46	401,05	18.448,30
<i>Retrofit LED</i>	76	257,60	19.577,60

5.3 Análise do Retorno do Investimento

A análise comparativa de sistemas de iluminação, para se estabelecer qual deles é o mais rentável, leva em consideração tanto os custos de investimento quanto os operacionais.

Na Tabela 44 apresentam-se o tempo do retorno do investimento decorrente da substituição da solução existente TLD T8, pelas hipóteses em estudo. Os valores listados resultam do cálculo anual do custo energético e do custo de manutenção de cada solução, considerando a inflação de 3% no preço da energia elétrica.

Para tal cálculo foi utilizada a Equação 9. Neste estudo foram consideradas existentes, como são, as luminárias com lâmpadas fluorescentes T8 e como tal, ser nulo o custo relativo à sua aquisição.

$$D_i = D_{i-1} - ((CEA_{T8} + CMA_{T8})_i - (CEA_x + CMA_x)_i) \quad \text{Equação 9 - Amortização}$$

Com $i > 0$; D_0 = Investimento inicial.

em que:

D_i - Dívida a amortizar no ano em análise;

- D_{i-1} - Dívida a amortizar no ano antecedente da análise;
- CEA - Custo de exploração anual;
- CMA - Custo de manutenção anual;
- x - Solução a comparar com T8.

Tabela 44 - Análise comparativa da amortização das diferentes soluções.

Anos	Amortização		
	T8 vs T5	T8 vs <i>Retrofit</i>	T8 vs <i>LED</i>
investimento	12105,36	19577,60	18448,30
1	11590,02	19658,05	18482,45
2	11061,57	19727,09	18500,65
3	10519,60	19784,37	18502,41
4	9963,71	19829,55	18487,25
5	9393,49	19862,25	18454,64
6	8808,50	19882,10	18404,08
7	8208,30	19888,72	18335,02
8	7592,43	19881,71	18246,91
9	6960,44	19860,67	18139,18
10	6311,82	19825,16	18011,23
11	5646,08	19774,76	17862,46
12	4962,71	19709,03	17692,25
13	4261,19	19627,49	17499,95
14	3540,95	19529,68	17284,90
15	2801,46	19415,11	17046,42
16	2042,11	19283,27	16783,81
17	1262,33	19133,65	16496,33
18	461,49	18965,71	16183,25
19	-361,03	18778,91	15843,80
20	-1205,88	18572,67	15477,18
21	-2073,74	18346,42	15082,58
22	-2965,29	18099,56	14659,16
23	-3881,25	17831,46	14206,07
24	-4822,35	17541,49	13722,39

Para mais intuitiva a leitura dos valores da Tabela 44, os mesmos são apresentados em forma gráfica na Figura 61.

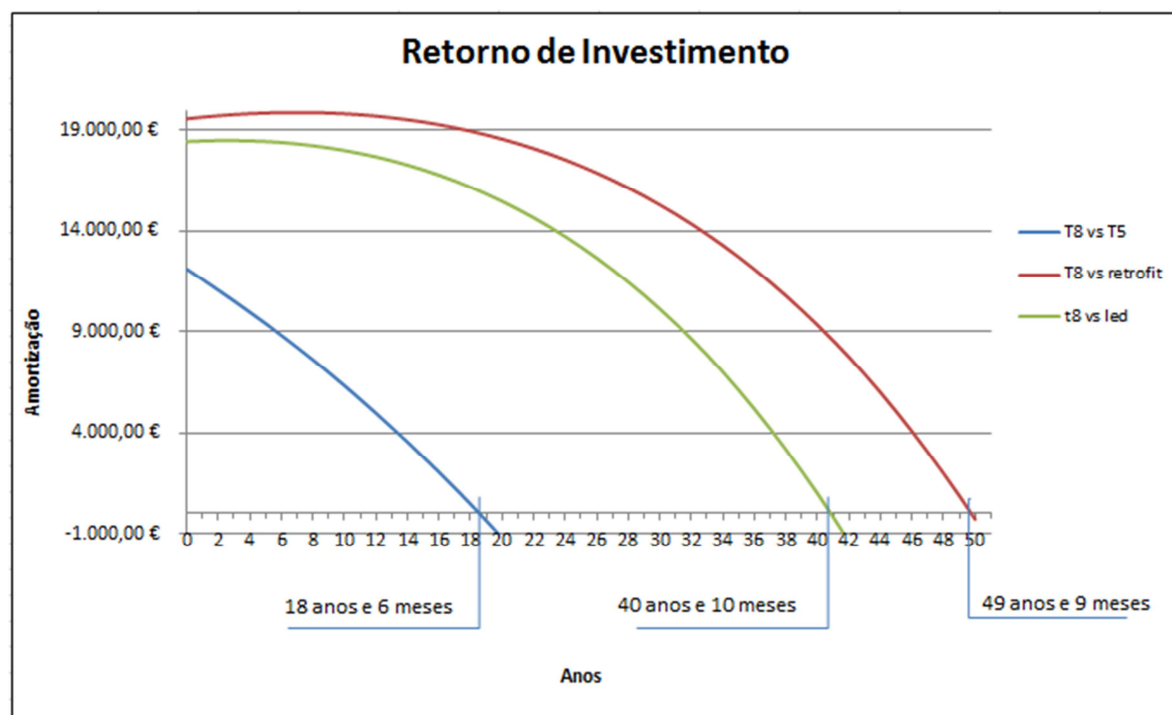


Figura 61 - Retorno de investimento.

Os resultados obtidos para a solução *Retrofit* evidenciam o desinteresse económico em optar por tal solução, porquanto a mesma, para satisfazer as necessidades normativas de iluminação passaria pelo aumento do número de luminárias. Dado que as luminárias existentes são descontinuadas no mercado, resultaria daí a necessidade de aquisição da totalidade das mesmas.

5.4 Análise de Rentabilidade

A Tabela 45 sintetiza os valores, ao fim de 24 anos da rentabilidade do investimento inicial, para cada solução.

Tabela 45 - Análise de rentabilidade ao fim de 24anos

Custos	Análise de Rentabilidade			
	T8	T5	Retrofit	LED
Investimento (€)		12.105,36	19.577,60	18.448,30
Custo energia (€)	47.248,08	32.192,95	34.149,82	28.937,48
Custo Manutenção (€)	5.117,46	3.244,88	16.179,61	18.702,15
Total (€)	52.365,54	47.543,19	69.907,03	66.087,93

5.5 Payback

Por definição *Payback* é o tempo após o qual a amortização do investimento inicial se concretiza.

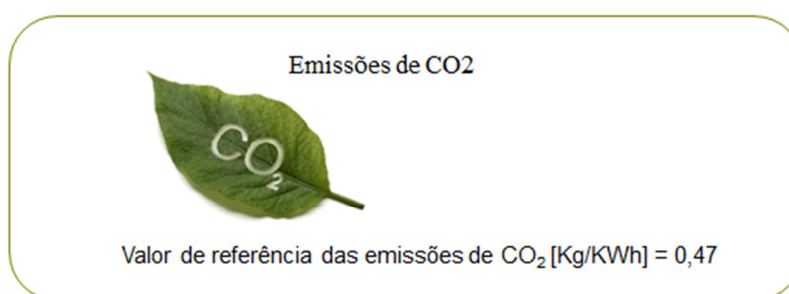
A Tabela 46 apresenta, de forma resumida, a evolução da amortização das 3 soluções em estudo. A Tabela completa daqueles valores está patente no anexo C.

Tabela 46 - *Payback*

Anos	Amortização			Valores Atuais			Tempo de Retorno
	T8 vs T5	T8 vs retrofit	t8 vs led	T8 vs T5	T8 vs retrofit	t8 vs led	
0	12.105,36 €	19.577,60 €	18.448,30 €				
18	461,49 €	18.965,71 €	16.183,25 €	271,08 €	11.140,36 €	9.505,95 €	18 anos e 6 meses
19	-361,03 €	18.778,91 €	15.843,80 €	-205,89 €	10.709,35 €	9.035,50 €	
40	-23.989,54 €	9.326,56 €	985,36 €	-7.354,16 €	2.859,12 €	302,07 €	40 anos e 10 meses
41	-25.494,09 €	8.546,38 €	-183,61 €	-7.587,76 €	2.543,64 €	-54,65 €	
49	-39.184,03 €	866,31 €	-11.546,41 €	-9.206,30 €	203,54 €	-2.712,83 €	49 anos e 9 meses
50	-41.123,35 €	-292,13 €	-13.244,16 €	-9.380,53 €	-66,64 €	-3.021,09 €	

5.6 Emissão de CO₂

O principal impacto ambiental da iluminação interior, na fase de utilização, é o consumo de energia e os gases com efeito de estufa associados.



Com base nos valores dos consumos energéticos anuais das distintas soluções patentes na Tabela 40 e considerando o valor de referência das emissões de CO₂, foram calculados os valores deste parâmetro para as distintas soluções, que se resumem na Tabela 47.

Tabela 47 - CO₂ não enviado para a atmosfera.

	T5 vs T8	LED vs T8	Retrofit LED vs T8
Poupança de consumo energético anual (KWh)	2.830,502	3.442,56	2.462,592
CO ₂ não enviado (Kg/KWh)	1.330,336	1.618,003	1.157,418

Este trabalho assentou em premissas e princípios de atuação em tudo idênticos aos que nortearam Kumpeerakupt (2012). Tal como aquele autor, acharam-se aqui significativas poupanças de energia consumida e redução da taxa de emissão de CO₂. Porém, não são análogas as conclusões relativas aos valores expeáveis de Retorno de Investimento. Refere aquele autor, Retorno de Investimento de respetivamente de 5,68 anos para T5 e de 1,12 anos para *LED* cujos valores correspondentes aqui achados são de 18,6 anos para T5 e 40,10 anos para *LEDs*, bastantes díspares portanto.

A convicção decorrente deste trabalho de ser o ainda relativamente o elevado custo de aquisição de luminárias equipadas com *LEDs*, um grande obstáculo a uma mais ampla utilização é

corroborada por Cowan (2011). Concorda-se naturalmente com os argumentos aduzidos pelo mesmo autor relativamente às vantagens dos *LEDs* decorrentes da sua baixa toxicidade por ausência de mercúrio habitualmente presente nas lâmpadas fluorescentes e à sua imunidade aos ciclos de acendimento e apagamento sem afetar a sua vida útil, ao contrário ao que ocorre nas lâmpadas fluorescentes.

Uma das limitações encontradas no programa consistiu na utilização no mesmo, de matriz de pontos mínimos para cada sala. Verificou-se que se forçado o programa à utilização do número de pontos calculados, que era sempre menor que o criado pelo programa, resultava uma distribuição não uniforme desses pontos impostos pela área da sala, conforme ilustra a título exemplificativo a Figura 62.

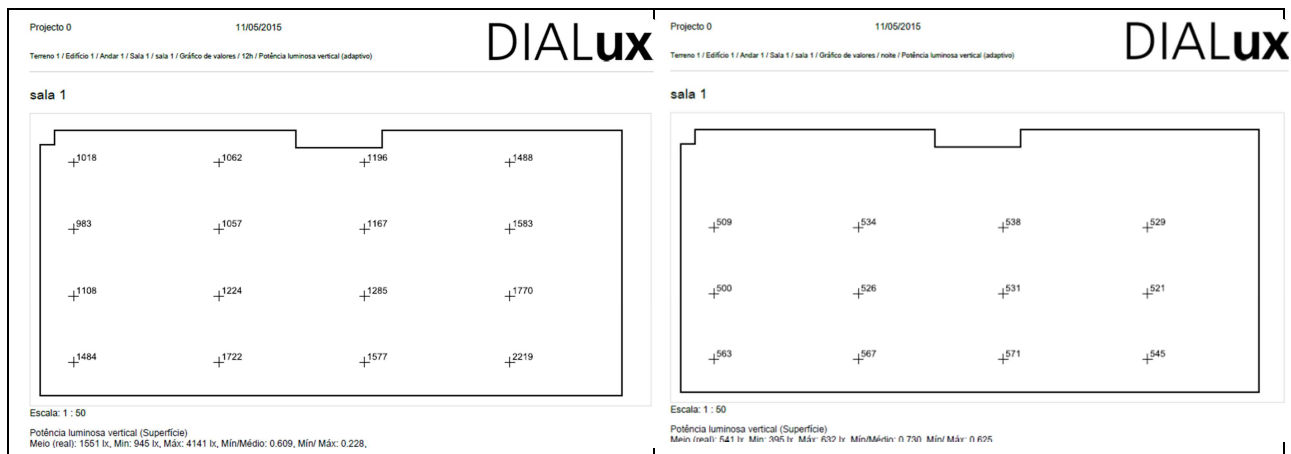


Figura 62 - Matriz de pontos 4x4 impostas ao *DIALux*

PARTE 4 – CONCLUSÃO

6 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A problemática da gestão dos recursos energéticos é uma das grandes preocupações da humanidade, sendo importantes todos os contributos para uma redução dos consumos energéticos.

Com base nesta problemática, este trabalho tinha por principal meta alcançar soluções para uma melhor eficiência energética, de tal modo que as medidas implementadas se refletissem na fatura da iluminação elétrica. O objetivo foi o de analisar e entender uma série de parâmetros técnicos que deve seguir um projeto de iluminação, de modo a propor medidas de intervenção razoáveis do ponto de vista de investimento, e que permitam a obtenção de resultados de forma a garantir a boa produtividade, saúde e o conforto dos utilizadores.

As recomendações e imposições vertidas no DL 243/86 (1986) e EN 12464-1 (2002) que foram ponto de partida na elaboração deste trabalho, estão globalmente satisfeitas nas distintas soluções encontradas. Com efeito, a temperatura de cor e o índice de restituição cromática das lâmpadas, 840 *PHILIPS* eleitas ($IRC=80$ e $TC= 4000$ K), o encandeamento, a uniformidade, o nível de iluminância média, a densidade de potência de iluminação relativa das distintas soluções, satisfazem o recomendado, para o local e tipo de utilização em causa.

Do ponto de vista técnico, ressaltam as seguintes considerações:

- As lâmpadas *LEDs* comparativamente com as restantes lâmpadas, revelam-se mais interessantes sob os pontos de vista de densidade de potência de iluminação e consumo energético. Em contrapartida, apresentam desde logo como principal desvantagem, o elevado investimento decorrente do custo de aquisição das mesmas do qual deriva o teórico *PAYBACK* calculado de 40,10 anos;
- Após o período do ciclo de vida dos *LEDs*, neste estudo de 23 anos, revela-se necessário a integral substituição dos mesmos com o consequente reinvestimento necessário o que não ocorre para a solução T5;
- A falência de um número significativo de *LEDs* antes do seu previsível fim de vida, acentua para pior a questão do retorno do investimento, deslastrando-o de forma considerável;
- Com a adoção massiva da tecnologia *LED*, e o aperfeiçoamento das técnicas de produção da mesma é crível que o preço reduza substancialmente por um lado e que se revele possível, contrariamente ao que agora ocorre, a substituição de componentes tornando o custo de manutenção mais baixo, por outro tornando a solução *LED* assumidamente apetecível.

Donde se conclui:

- A solução T5 é a melhor das estudadas e a que se propõe como a implementar no caso estudado;
- Para este trabalho em particular e conforme já referido ao longo do mesmo, a solução *retrofit*, contrariamente ao que poderia parecer em 1ª análise, não é a solução mais adequada. Com efeito a inexistência de luminárias T8 em quantidade que permita implementação do processo sem recurso à aquisição da totalidade das luminárias, devido à descontinuidade do modelo instalado, torna este tipo de tecnologia extremamente dispendioso e por consequência inadequado do ponto de vista financeiro;
- Na salas onde há influência de iluminação natural, conclui-se do não interesse de criar regulação de fluxo nos grupos de luminárias instaladas junto aos vãos envidraçados. De facto, a iluminação natural tem tal influência na iluminação da sala em geral e nessas zonas em particular, que torna desprezível qualquer ação de regulação do fluxo luminoso a encarar. A solução passará assim, pela criação de vários circuitos de iluminação para cada sala, estabelecidos de forma a tornar possível desligar, independentemente das outras, o conjunto de luminárias localizadas nas zonas de influência da iluminação natural. Como a maioria das salas dispõem de fenestrações propiciadoras de tais condições, salienta-se o interesse do estudo mais aprofundado de soluções que permitam, em termos de circuitos elétricos de alimentação das luminárias, deslastre das mesmas, particularmente das colocadas junto às janelas, visando redução de consumos energéticos;
- A generosidade do número de dias por ano com significativa iluminação natural permitindo manter desligada a iluminação das salas nas zonas das janelas e o facto de as salas em que se verifica esta circunstância de franca iluminação natural representar cerca de 80% do total das mesmas, concorrerão seguramente para uma significativa poupança de consumo de energia elétrica do edifício, se posta em prática tal medida. Concomitantemente com tal facto, o custo de instalação de sistemas de regulação de refluxo reforça a ideia do não interesse económico da instalação daqueles sistemas, nas situações aqui analisadas.

6.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Como perspetivas de desenvolvimentos futuros para este trabalho, sugere-se a monitorização do consumo do sistema de iluminação artificial de modo a comprovar e avaliar as informações técnicas fornecidas pelos fabricantes das luminárias, bem como a eficiência global do sistema instalado.

Como concluído neste trabalho é determinante o contributo da iluminação natural nos níveis de iluminação obtidos nos distintos locais. Seria interessante, a elaboração de um estudo que determinasse a área envidraçada a partir da qual os ganhos relativos à iluminação natural se revelem não compensadores face ao acréscimo energético das perdas, decorrente das trocas de calor entre o exterior e interior do edifício através dos vãos envidraçados, como ferramenta de apoio à elaboração de projetos de arquitetura de edifícios deste tipo.

Por outro lado e assente o pressuposto de interesse da existência de circuitos vários em cada sala, que permitam o funcionamento independente de luminárias correspondente à maior ou menor influência da iluminação natural em cada ambiente, deixa-se como proposta de atuação futura o

estudo da implementação de tal sistema e controlo do mesmo de modo automatizado e/ou a implementação de sistemas de controlo de iluminação baseados em regulação de fluxo, deteção de movimento e gestão técnica de iluminação, com conclusões que corroborem ou contrariem a opinião emanada neste trabalho, relativamente ao desinteresse do ponto de vista económico decorrente da implementação, nesta situação em concreto, de regulação de fluxo.

7 BIBLIOGRAFIA

- Bayir, E., Seker, N. N. C., & Karaoglu, M. (2013). The analysis on examples of energy efficiency in Passive Houses in terms of interior comfort. *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, (October), 984–989. <http://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749895>
- Burman, E., Mumovic, D., & Kimpian, J. (2014). Towards measurement and verification of energy performance under the framework of the European directive for energy performance of buildings. *Energy*, 77, 153–163. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.102>
- Cowan, K. R., & Daim, T. U. (2011). Understanding adoption of energy efficiency technologies: Applying behavioral theories of technology acceptance & use to understand the case of led lighting for commercial, residential, and industrial end-users. *2011 Proceedings of PICMET '11: Technology Management in the Energy Smart World (PICMET)*, 1–9.
- DL 243/86. DL 243/86 (1986).
- EDP. (2014). Soluções de Eficiência PME. Retrieved from https://energia.edp.pt/pdf/pme/IluminacaoEficiente_EDP_PME.pdf
- EN 12464-1. EN 12464-1, Lighting and Lighting - Lighting of Work Places – Part 1: Indoor Work Places (2002).
- Gan, C. K., Sapar, A. F., Mun, Y. C., & Chong, K. E. (2013). Techno-Economic Analysis of LED Lighting: A Case Study in UTeM's Faculty Building. *Procedia Engineering*, 53, 208–216. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.028>
- Islam, M. S., Dangol, R., Hyvarinen, M., Bhusal, P., Puolakka, M., & Halonen, L. (2013). User acceptance studies for LED office lighting: lamp spectrum, spatial brightness and illuminance level. *Lighting Research and Technology*, 47, 54–79. <http://doi.org/10.1177/1477153513514425>
- ISO 8995. Lighting of indoor work places (2002).
- Kamarulzaman, N., Saleh, a. a., Hashim, S. Z., Hashim, H., & Abdul-Ghani, a. a. (2011). An overview of the influence of physical office environments towards employees. *Procedia Engineering*, 20, 262–268. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.164>
- Keyvanfar, A., Shafaghat, A., Abd Majid, M. Z., Bin Lamit, H., Warid Hussin, M., Binti Ali, K. N., & Dhafer Saad, A. (2014). User satisfaction adaptive behaviors for assessing energy efficient building indoor cooling and lighting environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 277–295. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.094>
- Koh, L. H., Tan, Y. K., Wang, Z. Z., & Tseng, K. J. (2011). An energy-efficient low voltage DC grid powered smart LED lighting system. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2883–2888. <http://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119610>

- Kumpeerakupt, C., Rimsmutchai, S., Pawanawichien, N., Panjavarant, S., Bhasaputra, P., & Patlaraprakorn, W. (2012). The Optimal Energy Management of Sign Lighting System for Small and Medium Sizes of Bank in Thailand. *IEEE*, 1–4.
- Lee, L. M., & Hui, S. Y. (2009). Automatic lamp detection and operation for warm-start tubular fluorescent lamps. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(12), 2933–2941. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2023363>
- Lei 102/2009. Regime jurídico da promoção da segurança e saúde no trabalho (2009). Diário da República, 1ª série, N°176.
- Osram. (2007). *Manual Luminotécnico Prático*.
- Philips. (2015). *Tabela de iluminação Profissional*.
- Portaria 987/93. Portaria 987/93 (1993).
- Qin, Y., Lin, D., & Hui, S. Y. (Ron). (2009). A Simple Method for Comparative Study on the Thermal Performance of LEDs and Fluorescent Lamps. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(7), 1811–1818. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2017021>
- Ryckaert, W. R., Smet, K. a G., Roelandts, I. a a, Van Gils, M., & Hanselaer, P. (2012). Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. *Energy and Buildings*, 49, 429–436. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.042>
- Teixeira, A. (2007). *Iluminação Interior. Textos de apoio à unidade curricular de Luminotecnia e Instalações Industriais, FEUP*. FEUP.
- Veitch, J. a., & Newsham, G. R. (2013). Lighting Quality and Energy-Efficiency Effects on Task Performance, Mood, Health, Satisfaction, and Comfort. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27(March 2015), 107–129. <http://doi.org/10.1080/00994480.1998.10748216>
- Vitor, R., Monteiro, A., Lima, F. N. De, Luis, A., Irene, T., & Carvalho, R. De. (2014). LED Tubular Lamps and Tubular Fluorescent : Power Quality. *IEEE 16th International Conference*, 400–404.
- Wu, W. H., Kuo, C. H., Hung, M. W., & Huang, K. C. (2011). Evaluating method for the double image phenomenon of LED lighting. *Physics Procedia*, 19, 96–103. <http://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.131>

8 ANEXOS

ANEXOS A

Plantas do edifício

ANEXOS B

Grelha de Pontos e o Medido com o Luxímetro

ANEXOS C

Análise Comparativa

ANEXOS D

O Simulado no *DIALUX*